


## Method and apparatus for spectral analysis

Patent Number: EP0767361  
Publication date: 1997-04-09  
Inventor(s): BUCKWALD ROBERT A (IL); CABIB DARIO (IL); FRIEDMAN ZVI (IL); LIPSON STEPHEN G (IL)  
Applicant(s):: BUCKWALD ROBERT A (IL); CABIB DARIO (IL); FRIEDMAN ZVI (IL); C I SYSTEMS ISRAEL LTD (IL); LIPSON STEPHEN G (IL)  
Requested Patent: ☐ EP0767361, A3, B1  
Application Number: EP19930203737 19930722  
Priority Number (s): EP19930203737 19930722; US19950392019 19950221  
IPC Classification: G01J3/28  
EC Classification: C12Q1/68B22, G01J3/26, G01J3/28D, G01J3/44B, G01J3/457, G01N21/64H  
Equivalents:

---

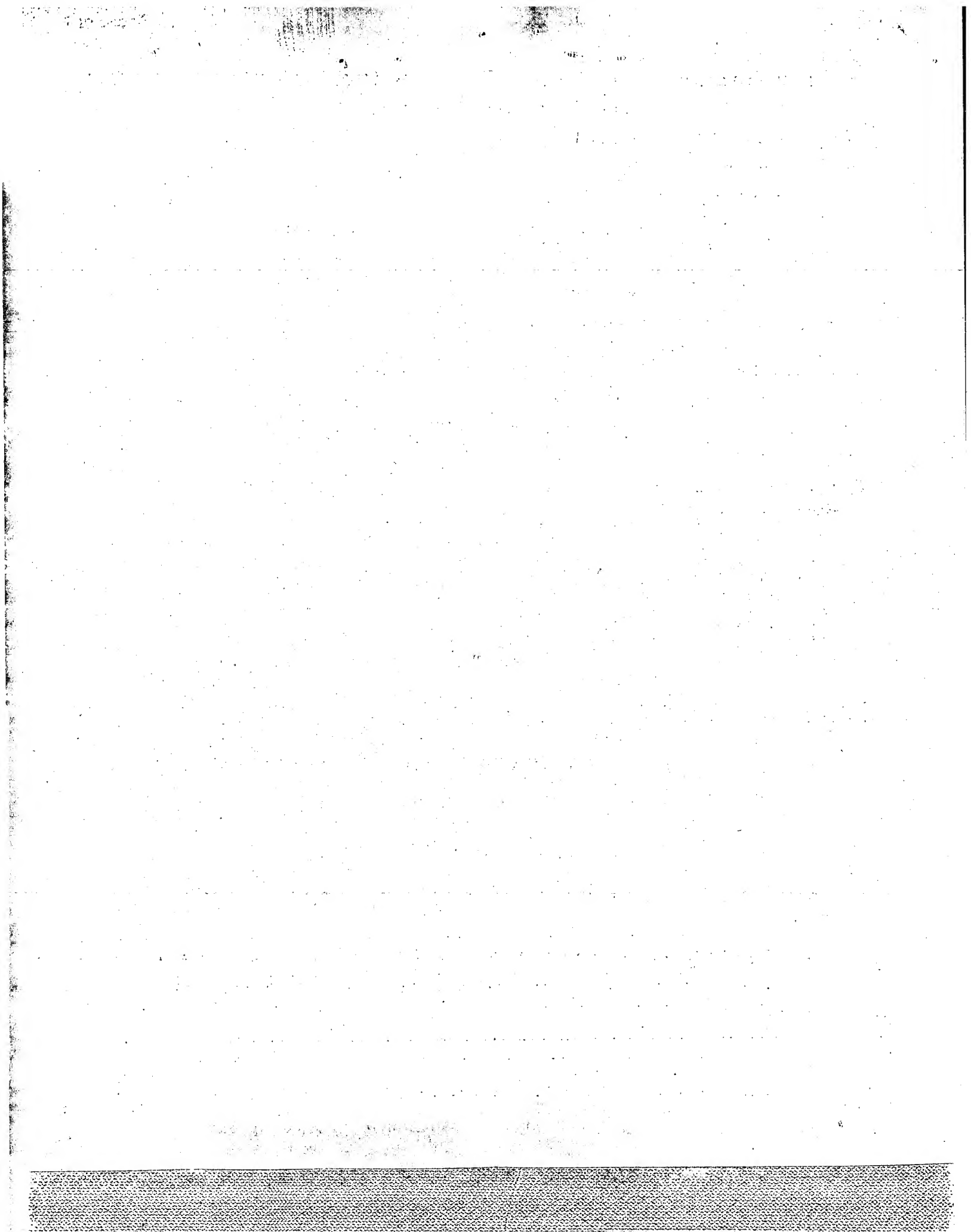
### Abstract

---

A method of analyzing an optical image of a scene to determine the spectral intensity of each pixel of the scene, which includes collecting incident light from the scene; (b) passing the light through an interferometer which outputs modulated light corresponding to a predetermined set of linear combinations of the spectral intensity of the light emitted from each pixel; focusing the light outputted from the interferometer on a detector array; and processing the output of the detector array to determine the spectral intensity of each pixel thereof. If the interferometer is of the moving type scanning in one dimension is required where the detector array is one dimensional, and no scanning when the detector array is two-dimensional. If the interferometer is of the non-moving type scanning is required in one dimension when the detector array is two-dimensional, and in two dimensions when the detector array is one-dimensional. 

---

Data supplied from the esp@cenet database - I2





DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

12 Übersetzung der  
europäischen Patentschrift

97 EP 0 767 361 B 1

10 DE 693 27 909 T 2

51 Int. Cl. 7:  
G 01 J 3/28  
G 01 B 9/02

- 21 Deutsches Aktenzeichen: 693 27 909.5  
96 Europäisches Aktenzeichen: 93 203 737.7  
96 Europäischer Anmeldetag: 22. 7. 1993  
97 Erstveröffentlichung durch das EPA: 9. 4. 1997  
97 Veröffentlichungstag  
der Patenterteilung beim EPA: 23. 2. 2000  
47 Veröffentlichungstag im Patentblatt: 13. 7. 2000

- 73 Patentinhaber:  
Applied Spectral Imaging Ltd., Migdal Haemek, IL
- 74 Vertreter:  
Schieber und Kollegen, 80469 München
- 84 Benannte Vertragsstaaten:  
AT, BE, CH, DE, DK, ES, FR, GB, GR, IT, LI, NL, SE

- 72 Erfinder:  
Cabib, Dario, 23840 Timrat, IL; Friedman, Zvi, 27 000  
Kiryat Bialik, IL; Lipson, Stephen G., Haifa, IL;  
Buckwald, Robert A., 30 095 Ramat Ishay, IL

54 Verfahren und Vorrichtung zur Spektralen Bilderfassung

Anmerkung: Innerhalb von neun Monaten nach der Bekanntmachung des Hinweises auf die Erteilung des europäischen Patents kann jedermann beim Europäischen Patentamt gegen das erteilte europäische Patent Einspruch einlegen. Der Einspruch ist schriftlich einzureichen und zu begründen. Er gilt erst als eingelegt, wenn die Einspruchsgebühr entrichtet worden ist (Art. 99 (1) Europäisches Patentübereinkommen).

Die Übersetzung ist gemäß Artikel II § 3 Abs. 1 IntPatÜG 1991 vom Patentinhaber eingereicht worden. Sie wurde vom Deutschen Patent- und Markenamt inhaltlich nicht geprüft.

DE 693 27 909 T 2

DE 693 27 909 T 2

## Verfahren und Vorrichtung zur Spektralanalyse

### GEBIET UND HINTERGRUND DER ERFINDUNG

Die vorliegende Erfindung betrifft Verfahren und Geräte zur Spektralanalyse und insbesondere das Analysieren eines optischen Bildes einer Szene, um die Spektralstärke eines jeden seiner Bildpunkte zu bestimmen. Ein Spektrometer ist ein Gerät, das aufgebaut ist, um Licht aufzunehmen, es in die Wellenlängen seiner Bestandteile zu trennen (aufzuteilen) und sein Spektrum zu erfassen. Ein Abbildungsspektrometer ist ein Spektrometer, das einfallendes Licht aus einer Szene auffängt und es analysiert, um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon zu bestimmen.

Das herkömmliche Abbildungsspektrometer schließt einen Schlitz in der Abbildungsebene ein, um die zu analysierende Szene abzutasten und das abgetastete Licht auf eine Gruppe von Detektoren zu bündeln. Wenn eine zweidimensionale Detektorgruppe verwendet wird, wird eine der Dimensionen der Gruppe verwendet, um die zu einem jeden einzigen Bildpunkt zugehörigen unterschiedlichen Wellenlängen abzutasten, während das Bildfeld durch einen eindimensionalen Scanner und die verbliebene Dimension der Gruppe abgedeckt wird. Wenn eine eindimensionale Detektorgruppe verwendet wird, wird das Bildfeld mechanisch in zwei Richtungen abgetastet, und alle Detektoren werden zu jedem vorgegebenen Zeitpunkt nur verwendet, um die unterschiedlichen Wellenlängen eines einzigen Bildpunktes abzutasten. In beiden Fällen gewährleistet der Schlitz in der Bildebene, daß zu jedem Zeitpunkt jeder Detektor nur einen Beitrag eines einzigen Bildpunktes an einer einzigen Wellenlänge sieht; anderenfalls wäre es unmöglich, die Spektren eines jeden Bildpunktes zu trennen.

Jedoch leiden die herkömmlichen schlitzartigen Abbildungsspektrometer unter dem Nachteil, daß die meisten Bildpunkte eines Rahmens nicht zu jedem vorgegebenen Zeitpunkt gemessen werden, selbst wenn die Vorlaufoptik des Spektrometers das

einfallende Licht eigentlich von ihnen allen gleichzeitig sammelt. Solchermaßen ist das herkömmliche schlitzzartige Verfahren in Bezug auf die verfügbare Information verschwenderisch, da - abgesehen von einer Wellenlänge - das meiste der Strahlung, das zu irgendeinem Zeitpunkt vom gemessenen Bildpunkt ausgestrahlt wird und einen speziellen Detektor erreicht, abgewiesen wird. Das Ergebnis ist, daß entweder eine relativ große Meßzeit benötigt wird, um die erforderliche Information mit einem vorgegebenen Rauschabstand zu erhalten, oder der Rauschabstand (die Empfindlichkeit) über eine vorgegebene Meßzeit wesentlich reduziert wird.

US-A-3 702 735 (Potter) beschreibt eine spektrale Abbildungsvorrichtung auf der Grundlage eines translatorischen Michelson-Interferometers ohne die Kollimation des einfallenden Lichtes.

Comptes Rendus des Seances de l'Academie des Sciences Serie II, Mecanique, Physique, Chimie, Sciences de la Terre, Sciences de L'Univers, Vol. 315, Nr. 1, (2. Juli, 1992), S. 45-49, (Le Coarer et al) "UN SPECTROMETRE IMAGEUR POUR L'ASTRONOMIE"; Astrophysical Journal, Vol. 259 (1982), S. 900-907, (Roesler et al.) "FAERY-PEROT/CCD OBSERVATIONS OF 'SIII! AND SII! EMISSIONS FROM THE JUPITER PLASMA TORUS"; und WO-A-94/19667 (Marinelli et al) beschreiben eine spektrale Abbildungsvorrichtung auf der Grundlage eines translatorischen hochfeinen Fabry-Perot-Interferometers.

US-A-4 509 857 (Vermande) und WO-A-90/07698 (Cerutti-Maori et al.) lehren eine spektrale Abbildungsvorrichtung auf der Grundlage eines unbeweglichen Interferometers.

Journal of Imaging Science and Technology, Vol. 36, Nr. 1 (1. September, 1992), S. 417-422, (Hammer et al.) "REMOTE SENSING OF EARTH'S ATMOSPHERE AND SURFACE USING A DIGITAL ARRAY SCANNED INTERFEROMETER: A NEW TYPE OF IMAGE SPECTROMETER"; und US-A-4976542 (Smith) beschreiben eine spektrale Abbildungsvorrichtung, das Interferogramme ausgibt.

Eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung liegt darin, ein neuartiges Verfahren und Gerät zur Spektralanalyse von Bildern bereitzustellen, die hinsichtlich des obigen vorteilhaft sind.

Genauer erläutert, ist es eine Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren und Gerät zur Spektralanalyse von Bildern zur Verfügung zu stellen, das die aus dem aufgefangenen einfallenden Licht des Bildes verfügbare gesamte Information besser verwendet, um verglichen mit dem herkömmlichen "schlitzartigen" Abbildungsspektrometer die erforderliche Rahmenszeit wesentlich zu reduzieren und/oder den Rauschabstand wesentlich zu erhöhen.

#### ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

Gemäß der vorliegenden Erfindung wird ein Verfahren und Gerät, wie in den anliegenden Ansprüchen bestimmt, bereitgestellt.

Das Verfahren kann durchgeführt werden, indem verschiedene Interferometerarten verwendet werden, und zwar sowohl von der beweglichen Art, worin die optische Wegdifferenz (OPD - optical path difference) verändert wird, um das Licht zu modulieren, indem das ganze Interferometer oder ein Element im Interferometer bewegt wird, als auch von der nicht-beweglichen Art, worin die OPD mit dem Einfallswinkel der ankommenden Strahlung verändert wird. In jedem Interferometer der beweglichen Art betrachtet solchermaßen jeder Detektor in jedem Moment einen unbeweglichen Punkt der Szene, und sein Signal ist eine lineare Kombination des Spektralinhalts der davon emittierten Strahlung, die mit der Zeit variiert. Wenn der Scanner eine Abtretung des Interferometers abschließt, wird die Szene an allen relevanten linearen Kombinationen des Spektralinhalts abgetastet worden sein. Im Interferometer der unbeweglichen Art, worin die OPD mit dem Einfallswinkel des ankommenden Lichtes variiert, betrachtet zu jedem Zeitpunkt jeder Detektor einen verschiedenen Punkt der Szene, und sein Signal ist eine unterschiedliche lineare Kombination des Spektralinhalts. Wenn der Scanner die Abtretung eines Rahmens beendet, wird der ganze Rahmen an allen relevanten linearen Kombinationen des Spektralinhalts abgetastet worden sein.

Zu Veranschaulichungszwecken wird die Erfindung nachstehend beschrieben, als durch die Verwendung der Fabry-Perot- und Michelson-Interferometer als Beispiele für die Interferometer beweglicher Art implementiert, und als durch die Verwendung der

Michelson- und Sagnac-Interferometer als Beispiele für die Interferometer unbeweglicher Art implementiert.

Die Erfindung stellt auch ein Gerät zur Spektralanalyse des Bildes in Übereinstimmung mit dem obigen Verfahren bereit.

Die Verfahren und Geräte in Übereinstimmung mit den obigen Merkmalen unterscheiden sich von den herkömmlichen schlitzzartigen Abbildungsinterferometern durch die Verwendung eines wie oben beschriebenen Interferometers anstelle eines Gitters oder eines Prismas, ohne die gesammelte Energie mit einer Öffnung bzw. einem Schlitz zu beschränken, wodurch die Gesamtleistung des Systems wesentlich verbessert wird. Derartige Verfahren und Geräte verwenden auf diese Weise besser die aus dem Einfallslight der zu analysierenden Szene verfügbare gesamte Information, wodurch die Meßzeit wesentlich verringert wird und/oder der Rauschabstand (Empfindlichkeit) wesentlich verbessert wird.

Man erwäge beispielsweise den "Whiskerkristallbesen"- (whisk broom)-Aufbau, der in John B. Wellmans Imaging Spectrometers for Terrestrial and Planetary Remote Sensing, SPIE-Veröffentlichung, Vol. 750, S. 140 (1987) beschrieben wird.

Es wird angenommen, daß  $n$  die Anzahl der Detektoren in der linearen Gruppe,  $m \times m$  die Zahl der Bildpunkte in einem Rahmen, und  $T$  die Rahmenszeit ist.

Die über alle Detektoren der Gruppe addierte gesamte Verweilzeit an jedem Bildpunkt ist:

$$nT/m^2$$

Durch die Verwendung der gleichgroßen Gruppe und derselben Rahmensrate in einem Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung ist die über alle Detektoren addierte gesamte Verweilzeit an einem speziellen Bildpunkt dieselbe,  $nT/m^2$ . Während jedoch in einem herkömmlichen Gitter- bzw. Prismaverfahren die durch jeden Detektor zu jedem Zeitpunkt gesehene Energie in der Größenordnung von  $1/n$  des Ganzen liegt, da die Wellenlängenauflösung  $1/n$  des Bereichs ist, liegt die Energie in einem Verfahren gemäß der vorliegenden Erfindung in der Größenordnung der Einheit, da die Modulationsfunktion eine sinusförmige (Michelson) bzw. ähnliche periodische Funktion ist (niedrige Feinheit Airy-Funktion mit

Fabry-Perot), deren Durchschnitt über viele Perioden 50% ist. Auf der Grundlage der Standardbehandlung des Jacquinet-Vorteils (bzw. Multiplexvorteils), die in den Lehrbüchern für die Interferometrie beschrieben wird, ist es möglich, zu zeigen, daß die Vorrichtungen gemäß der vorliegenden Erfindung Meß-Rauschabstände aufweisen, die um einen Faktor von  $n^{0,5}$  im Infrarotbereich (Hintergrund-begrenzte Leistung) verbessert werden, und um die Quadratwurzel des Quotienten zwischen dem Signal an einer speziellen Wellenlänge und dem mittleren Signal in einem Spektralbereich bei Wellenlängen eines schmalen Spitzenwerts im sichtbaren Bereich (Photon-Rauschabstand eingeschränkte Leistung) verbessert werden. Für eine mathematische Behandlung und Definition des Fabry-Perot-Interferometers und eine Definition der Airy-Funktion, siehe Max Born and Emil Wolf, Principles of Optics, Pergamon Press, 1980, S. 329.

In allen unten beschriebenen Ausführungsformen der Erfindung werden alle erforderlichen optischen Phasendifferenzen gleichzeitig mit der räumlichen Abtretung des Bildfeldes abgetastet, um all die Information zu erhalten, die erforderlich ist, um das Spektrum zu rekonstruieren, so daß die Spektralinformation gleichzeitig mit der Abbildungsinformation gesammelt wird.

Die Erfindung kann in Zusammenhang mit vielen unterschiedlichen optischen Aufbauten wie beispielsweise einem Teleskop zum Fernabtasten, einem Mikroskop für Laboranalysen, Lichtwellenleiter für die industrielle Überwachung, usw. verwendet werden. Zusätzlich kann jeder Wellenlängenbereich mit geeigneten Filtern und optischen Geräten ausgewählt werden.

#### KURZE BESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGEN

Die Erfindung wird hierin exemplarisch unter Bezugnahme auf die begleitenden Zeichnungen beschrieben, worin:

FIG. 1 ein herkömmliches schlitzzartiges Abbildungsspektrometer aus dem Stand der Technik darstellt;

FIG. 2 ein Blockdiagramm ist, das die Hauptbestandteile eines in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung aufgebauten Abbildungsspektrometers darstellt;



FIG. 3 ein Diagramm ist, das ein in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung aufgebautes Abbildungsspektrometer auf der Grundlage eines Interferometers beweglicher Art, nämlich ein Fabry-Perot-Interferometer mit abgetasteter Dicke, darstellt;

FIG. 4 ein Michelson-Interferometer mit Rückstrahlern darstellt, das als Interferometer der unbeweglichen Art im Abbildungsspektrometer der Fig. 2 verwendet wird;

FIG. 5 ein Diagramm ist, das ein weiteres Interferometer beweglicher Art, nämlich ein Michelson-artiges Interferometer, zeigt, das als das Interferometer im Abbildungsspektrometer gemäß der vorliegenden Erfindung verwendet wird;

FIG. 6 ein anderes Interferometer unbeweglicher Art, nämlich ein modifiziertes Sagnac-Interferometer, darstellt, wie es in einem Abbildungsspektrometer gemäß der Erfindung verwendet wird;

FIG. 6A noch ein anderes Interferometer unbeweglicher Art, nämlich ein modifiziertes Sagnac-Interferometer, darstellt, wie es in einem Abbildungsspektrometer gemäß der Erfindung verwendet wird;

FIG. 7 schematisch zeigt, daß die Drehung eines Strahls am Eingang zu einem Interferometer - wie beispielsweise dem der Figuren 6 und 6A - auch den Strahl am Ausgang um denselben Winkel dreht und die OPD zwischen den entsprechenden aufgeteilten Strahlen verändert;

FIG. 8 schematisch zeigt, daß durch die Drehung des Interferometers dieselbe Wirkung wie in Fig. 7 gezeigt, erreicht werden kann;

FIG. 9 die Erfindung als in einem modifizierten Michelson-Abbildungsspektrometer verkörpert zeigt, und zwar als ein Beispiel für ein weiteres Interferometer der beweglichen Art mit Bündelung auf die Spiegel durch Mikroskopobjektive;

FIG. 10 ein modifiziertes Sagnac-Interferometer wie in den Figuren 6 und 6A zeigt, worin jedoch das Abtasten durch ein bewegliches Element des Interferometers durchgeführt wird;

FIG. 11 ein Interferometer wie in den Figuren 6 und 6A zeigt, allerdings mit einer zusätzlichen bei  $90^\circ$  zum Strahlentrenner befindlichen optischen Platte, die aus einem

lichtdurchlässigen Material hergestellt ist;

FIG. 12 ein Interferometer zeigt, das dem aus Figur 11 gleicht, allerdings mit einer anderen Ausrichtung der verschiedenen Bestandteile, wobei sich die zusätzliche optische Platte 138 ebenfalls bei  $90^\circ$  zum Strahlentrenner befindet;

FIG. 13 ein Michelson-artiges Interferometer zeigt, das jenem in Figur 5 gezeigten gleicht, jedoch eine zweidimensionale Detektorgruppe aufweist;

FIG. 14 ein Sagnac-Interferometer wie in Figur 1 zeigt, jedoch eher mit einem Abtastspiegel als mit einem Strahlentrenner;

FIG. 15 der Figur 14 mit Ausnahme davon gleicht, daß der Abtastspiegel einseitig ist.

#### BESCHREIBUNG DER BEVORZUGTEN AUSFÜHRUNGSFORMEN

Zum Zwecke des besseren Verständnisses der vorliegenden Erfindung, wie sie in den Figuren 2-15 der Zeichnungen dargestellt ist, wird als erstes auf den Aufbau und die Wirkungsweise eines herkömmlichen schlitzzartigen Abbildungsspektrometers aus dem Stand der Technik Bezug genommen, das eine zweidimensionale Detektorgruppe wie in Fig. 1 dargestellt verwendet.

Solchermaßen umfaßt das schlitzzartige Spektrometer aus dem Stand der Technik, wie in Figur 1 dargestellt, ein optisches Sammelsystem wie beispielsweise ein mit 2 bezeichnetes Teleskop, um das einfallende Licht aus der schematisch mit 4 bezeichneten Szene einzufangen und das im wesentlichen parallele Licht der Szene auf eine durch einen Schlitz 6 eingenommene erste Brennebene zu bündeln. Das aus dem Schlitz 6 austretende Licht wird in einer Kollimatorlinse 8 kollimiert und durch ein Übertragungs- oder Strahlungs-Gitter 10 hindurchgeführt, um die unterschiedlichen Wellenlängen zu trennen. Die Ausgabe aus dem Gitter 10 wird durch eine Bündelungslinse 12 auf eine zweidimensionale Detektorgruppe 14 in einer zweiten Brennebene gebündelt. Die Ausgabe der Detektorgruppe 14 wird einem Signalprozessor 16 zugeführt.

In der zweidimensionalen Gruppe von Detektoren 14, die im Abbildungsspektrometer aus dem Stand der Technik der Fig. 1 dargestellt wird, bewirkt die Bewegung des Systems (z. B. in

einem Luftfahrzeug verkörpert) die Abtretung entlang einer Dimension. Die Abtretung entlang der zweiten Dimension wird durch den Schlitz 6 durchgeführt, der senkrecht zur Bewegungsrichtung des Systems ausgerichtet ist. Der Schlitz 6 gewährleistet auf diese Weise, daß jeder Detektor innerhalb der Gruppe 14 zu jedem Zeitpunkt nur den Beitrag eines Bildpunktes an einer einzigen Wellenlänge sieht; dies ist notwendig, um die Spektren eines jeden Bildpunktes zu trennen.

Wie zuvor erwähnt, liegt der Nachteil des in Fig. 1 dargestellten Verfahrens aus dem Stand der Technik darin, daß die meisten der Bildpunkte eines Rahmens nicht zu jedem vorgegebenen Zeitpunkt gemessen werden, obwohl das Teleskop 2 (oder ein anderes optisches Sammelgerät) eigentlich Energie von ihnen allen gleichzeitig sammelt. Als ein Ergebnis erhöht sich die erforderliche Rahmenszeit beträchtlich und/oder der Rauschabstand (Empfindlichkeit) wird in Bezug auf ein System, das einen solchen Schlitz nicht benötigt (falls ein derartiges System existieren würde), wesentlich vermindert.

Figur 2 ist ein Blockdiagramm, das die Hauptbestandteile eines in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung aufgebauten Abbildungsspektrometers darstellt.

Solchermaßen schließt das Abbildungsspektrometer aus Figur 2 folgendes ein: ein allgemein mit 20 bezeichnetes optisches Sammelsystem; einen eindimensionalen oder zweidimensionalen Scanner, wie durch den Block 22 bezeichnet; einen optischen Wegdifferenz-Generator (OPD-Generator) oder ein Interferometer, wie durch den Block 24 bezeichnet; eine eindimensionale oder zweidimensionale Detektorgruppe, wie durch den Block 26 bezeichnet; und einen Signalprozessor und eine Anzeige, wie durch den Block 28 bezeichnet.

Es ist durchweg beabsichtigt, daß die Strahlung - wie beispielsweise zu analysierendes Licht - aus einer großen Vielfalt von Quellen kommen kann. Zum Beispiel kann die Quelle die Strahlung spontan emittieren oder reflektieren oder die Strahlung von einer Lampe oder von einem anderen beleuchteten Gegenstand übertragen. Mit der geeigneten Beleuchtung, wie beispielsweise UV-Strahlen eines Lasers, und mit geeigneten

Mitteln, die verhindern, dass die beleuchtenden Wellenlängen die Spektralabbildungsgeräte erreichen, können Fluoreszenz- oder Raman-Spektral-Abbildungsmessungen durchgeführt werden, um über den bzw. die in jedem Fall in Frage stehenden Gegenstand bzw. Gegenstände unterschiedliche Informationen zu erhalten.

Ein kritisches Element im neuartigen System ist der optische Wegdifferenz-Generator oder das Interferometer 24, der bzw. das modulierte Licht ausgibt, das einem vorbestimmten Satz linearer Kombinationen der Spektralstärke des von jedem Bildpunkt der zu analysierenden Szene ausgestrahlten Lichtes entspricht. Die Ausgabe des Interferometers wird auf die Detektorgruppe 26 gebündelt. Solchermaßen werden gleichzeitig mit der räumlichen Abtretung des Bildfeldes alle erforderlichen optischen Phasendifferenzen abgetastet, um die benötigte Gesamtinformation zu erhalten, damit das Spektrum rekonstruiert wird. Das Spektrum aller Bildpunkte in der Szene wird solchermaßen gleichzeitig mit der Abbildungsinformation gesammelt, wodurch die Analyse des Bildes in Echtzeit erlaubt wird.

Ein Verfahren und ein Gerät gemäß der vorliegenden Erfindung können in einer großen Anzahl von Aufbauten praktisch umgesetzt werden. Speziell das verwendete Interferometer kann entweder der beweglichen oder unbeweglichen Art sein, und die Detektorgruppe kann unabhängig von der Art des Interferometers ein- oder zweidimensional sein. Wenn das Interferometer der beweglichen Art ist und die Detektorgruppe zweidimensional ist, ist mit Ausnahme der Bewegung des Interferometers, was eine OPD-Abtretung bedeutet, keine Abtretung erforderlich. Wenn das Interferometer der beweglichen Art ist und die Detektorgruppe eindimensional ist, wird die räumliche Abtretung in einer Dimension erforderlich. Wenn das Interferometer der unbeweglichen Art ist und die Detektorgruppe zweidimensional ist, wird eine OPD-Abtretung in einer Dimension erforderlich. Wenn das Interferometer der unbeweglichen Art ist und die Detektorgruppe eindimensional ist, ist das Abtasten in zwei Dimensionen erforderlich, wobei eine Dimension eine räumliche Abtretung betrifft, während die andere eine OPD-Abtretung

betrifft.

Figur 3 stellt eine Form des Abbildungsspektrometers dar, das in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung aufgebaut ist. Dieses Spektrometer basiert auf die Verwendung eines unbeweglichen Interferometers, nämlich eines Fabry-Perot-Interferometers 33 mit abgetasteter Dicke, in dem die OPD (optische Wegdifferenz) verändert wird, um das Licht zu modulieren.

Auf diese Weise umfaßt das in Figur 3 dargestellte Abbildungsspektrometer eine allgemein mit 30 bezeichnete zu analysierende Szene oder Quelle, um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes der Szene zu bestimmen. Die Szene 30 kann eine Quelle einer inkohärenten nicht-monochromatischen Strahlung sein. Das schematisch mit 31 gezeigte optische Sammelsystem wäre dann ein Teleskop, wenn die Szene in einem Abstand für Fern-Abtastanwendungen läge; alternativ kann die Szene 30 für die Mikroskopanalyse nah sein: für diesen Fall wäre das optische Sammelsystem 31 ein Mikroskop.

Das optische System 31 sorgt für eine Ausgabe an einen eindimensionalen mechanischen Scanner, z. B. einen mit 32 bezeichneten Spiegelscanner, um die Szene abzutasten. Die Ausgabe aus dem Scanner 32 wird einem Fabry-Perot-Interferometer 33 zugespeist, das über ein Etalon verfügt, das aus zwei Ebenen um einen Abstand "d" voneinander beabstandeten parallelen Reflektoren hergestellt ist. In diesem Beispiel ist der Abstand "d" veränderlich, indem ein mechanischer Scanner, in diesem Fall ein piezoelektrischer Scanner 34, verwendet wird.

Die Ausgabe aus dem Fabry-Perot-Interferometer 33 wird über ein optisches Wiederbündelungssystem 35 einer eindimensionalen Gruppe von Detektoren 36 zugespeist, deren Ausgaben einem Signalprozessor 37 zugeführt werden. Wenn eine eindimensionale Detektorgruppe verwendet wird, kann der Scanner 32 weggelassen werden.

Das optische System 31, zum Beispiel ein afokales Teleskop oder Mikroskop, erzeugt an seinem Ausgang einen im wesentlichen parallelen Strahl (d. h. genau parallel oder einen, der ein sehr großes F/N<sub>0</sub> Verhältnis aufweist), da auf diese Weise jeder Detek-

tor innerhalb der Gruppe 36 einer einzigen optischen Phasendifferenz durch das Etalon 34 des Fabry-Perot-Interferometers 33 entspricht. Das optische System 31 kann entweder refraktiv oder reflektiv sein. Das Etalon 33 des Interferometers liegt in Bezug auf die optische Achse des Systems bei  $90^\circ$ . Es wird angemerkt, daß keine Verwendung einer Bildfeld-einschränkenden Öffnung bzw. eines Schlitzes stattfindet.

Das in Figur 3 dargestellte Abbildungsspektrometer arbeitet wie folgt: ein Detektorelement i der Gruppe 36 empfängt die Strahlung aus einem Strahl, der das Etalon 33 an einem festen Winkel ( $\phi_i$ ) zwischen seiner Sichtlinie und der normalen zum Etalon durchquert, weshalb er diese Strahlung immer durch eine optische Wegdifferenz  $\delta_i$  sieht, die folgendermaßen angegeben wird:

$$\delta_i = 2\pi 2d (n^2 - \sin^2 \phi_i)^{0.5} / \lambda \quad (1)$$

worin  $\lambda$  die Wellenlänge der betrachteten Wellenlänge und  $n$  der Brechungsindex der Luft zwischen den Platten ist.

Die gesamte Strahlung, die den Detektor  $i_k$  zu jedem vorgegebenen Zeitpunkt von einem bestimmten Bildpunkt  $k$  des Strahlungseingangs 30 erreicht, ist die Faltung des Spektrums jenes Bildpunktes mit der Airy-Funktion, und zwar wie folgt (Max Born und Emil Volf, Principles of Optics, Pergamon Press, 1980, S. 327):

$$I_{ik} = \int \{I_k(\lambda) / (1 + F \sin^2[\delta_i(\lambda)/2])\} d\lambda \quad (2)$$

worin die Integration zwischen  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  liegt, und

$\lambda_1, \lambda_2$  = Grenzen des Spektralbereichs

$I_k(\lambda)$  = Spektralstärke der Quelle am Bildpunkt  $k$

$F$  = Feinheitkoeffizient, der wie folgt zum Reflexionsvermögen des Etalons  $R$  bezogen ist:

$$F = 4R / (1 - R)^2$$

$i_k$  = dieser spezielle Detektor, der den Bildpunkt  $k$  über eine optische Wegdifferenz  $\delta_i(\lambda)$  abbildet.

Was folgt, ist eine der vielen Modalitäten zum Abtasten des Bildfeldes und der Dicke des Etalons 33.

Angenommen, die Gruppe 36 setzt sich aus einem linearen Satz von N-Detektoren zusammen, deren Signale gleichzeitig und unabhängig voneinander überwacht werden können. Angenommen, daß der Scanner 32 eine rasterartige Abtretung der m-Zeilen (größer als N) durchführt und die Ebene des Papiers in Figur 3 die senkrechte Richtung bildet. Jedesmal, wenn der Scanner 32 eine horizontale Linie abgetastet hat, wird die Dicke "d" des Etalons 33 synchron mit dem Scanner 32 durch den piezoelektrischen Scanner 37 inkrementiert, von  $d = 0$  anfangend, bis N-Zeilen abgetastet und N Dicke-Stufen durchgeführt werden. In diesem Zeitpunkt wird die Dicke des Etalons auf ihren ursprünglichen Wert zurückgeführt, und die Dicke wird erneut abgetastet. Der Vorgang wird solange wiederholt, bis der Scanner ein kompletter Rahmen abgetastet hat.

Abgesehen von einem Randbereich der N-Bildpunkte an der Oberseite und Unterseite des Bildfeldes, werden alle Bildpunkte des Bildfeldes durch verschiedene Detektoren mit N optischen Wegdifferenzen gemessen. Alle Detektorsignale werden abgetastet und mit einer derart hohen Rate aufgenommen, daß die gesamte benötigte Information gesammelt wird und dem Signalprozessor 37 zugeführt wird, um sowohl das Bild als auch die Spektren aller Bildpunkte zu rekonstruieren.

Wie oben erwähnt, ist ein weiterer möglicher Aufbau einer, der eine zweidimensionale Gruppe von Detektoren einschließt: in diesem Fall wird dieselbe Idee eingesetzt; allerdings wird eine räumliche Abtretung erspart.

Wenn beispielsweise die Gruppe eine  $N \times m$  Matrix in einer "Druckbesen"-Vorgehensweise ("push broom") ist, die jenem ähnelt, der auf Seite 142 von John B. Wellman, Imaging Spectrometers for Terrestrial and Planetary Remote Sensing, SPIE Proceedings, Vol. 750, S. 140 (1987), beschrieben wird, entsprechen die N-Zeilen und m-Spalten derselben Matrix im Objektraum.

In diesem Aufbau wird die Fabry-Perot-Dicke oder die optische Phasendifferenz über die Integrationszeitdauer einer

Zeile unverändert gehalten. Dann führt der Scanner einen Schritt senkrecht durch, und die Fabry-Perot-Dicke  $d$  wird synchron dazu um eine Stufe, von Null einsetzend, erhöht, bis  $N$ -Stufen durchgeführt sind. Zu diesem Zeitpunkt setzt der Scanner die senkrechte Abtastung fort, die Dicke startet wiederum bei Null, und es werden die Schritte wiederholt, bis der komplette Rahmen abgetastet ist.

Auf diese Weise werden alle Bildpunkte mittels aller optischen Phasendifferenzen gemessen und die aufgezeichnete Information wird verarbeitet, um die Spektren eines jeden Bildpunktes zu liefern.

Die Rekonstruktion des Spektrums eines jeden Bildpunktes kann durch die geeignete mathematische Bearbeitung wie folgt unternommen werden:

Man teilt den interessierenden Spektralbereich  $\lambda_1$  bis  $\lambda_2$  in  $N$ -Intervalle. Wenn das Integral der Gleichung (2) als eine Summe über  $N$ -Wellenlängenintervalle genähert wird, ist die Gleichung (2) das Produkt einer  $N \times N$  dimensional Matrix, die wie folgt vorgegeben ist:

$$A_{ij} = 1 / [1 + F \sin(2\delta_{ij}/2)] \quad (3)$$

und ein  $N$  dimensionaler Vektor  $I_k(\lambda_j)$ , worin  $j$  die  $N$ -Wellenlängenintervalle abtastet und  $k$  ein spezifischer Bildpunkt im Bildfeld ist. Wenn die Matrix  $A_{ij}$  invertiert wird und diese um den Vektor  $I_{ik}$  multipliziert wird ( $i_k=1, \dots$  bis  $n$ ), erhält man den Vektor  $I_k(\lambda_j)$ , der das Spektrum des Bildpunktes  $k$  darstellt.

In Bezug auf die Spektralauflösung sollte man zwei beinahe monochromatische Quellen erwägen, die am gleichen Bildpunkt plaziert werden.

Vorzugsweise liegt die Feinheit  $F$  des Fabry-Perot-Interferometers 33 im Bereich um  $F=10$  herum, da (aus der Figur 7.58 der oben zitierten Born und Wolf-Veröffentlichung) zu ersehen ist, daß es in diesem Fall genug Modulation in der Airy-Funktion gibt, und daß sie gleichzeitig nicht sehr schmale Zeilen liefert. Tatsächlich entspricht dieser Aufbau nicht einer sehr hohen Wellenlängenauflösung, aber er ist erforderlich,



damit zwischen den schmalen Spitzenwerten der Airy-Funktion keine bedeutsame Strahlungsgröße verlorengeht. Dies ist eine wünschenswerte Situation, da aufgrund der Abbildung in jedem Fall eine hohe Auflösung zu viel Information, die zu handhaben ist, liefert.

Die Behandlung der Auflösung auf Seite 334 der Born und Wolf-Veröffentlichung ist immer noch gültig, da, wenn man

$$\sin(\epsilon/4) = (\epsilon/4) - 1/(F)^{0.5} = 1/0.3 \sim 0.3 \quad (4)$$

gleich setzt, man sieht, daß man bei der Approximierung von  $\epsilon/4$  mit  $\epsilon/4$  einen Fehler von etwa 10% macht.

So hat man in diesem Fall

$$\mathcal{F} = \pi/2 (F)^{0.5} = 5 \quad (5)$$

und das Auflösungsvermögen ist

$$\lambda/\Delta\lambda \sim 2 \mathcal{F} n d / \lambda \quad (6)$$

Um eine Idee über die Größenordnung zu bekommen und die Übereinstimmung zu überprüfen, sollte angenommen werden, daß

$$N = 50 \text{ Detektoren in der Gruppe} \quad (7)$$

$$\Delta\lambda = 3\mu/50 = 0.06\mu \quad (8)$$

und

$$\lambda = 2 \text{ zu } 5\mu \quad (9)$$

Daher ist  $d$  der Bereich

$$d = \lambda^2 / \Delta\lambda (2 \mathcal{F} n)^{-1} \quad (10)$$

Nimmt man  $n=1$  für Luft, so ergibt die Gleichung (10) folgendes

$$d = 10 / (0.06 \times 10) = 16\mu \quad (11)$$

Der Bereich  $d$  ist derart gewählt, daß er denselben Bereich der optischen Phasendifferenzen als den Wellenlängenbereich abtastet; daher

$$d_2/\lambda_1 - d_1/\lambda_1 = d/\lambda_1 - d/\lambda_2 \quad (12)$$

oder

$$d_2 - d_1 = d[1 - \lambda_1/\lambda_2] = 16 \times 0.3 = 5\mu \quad (13)$$

Daher liegen die Stufen für die Dicke in der Größenordnung von

$$5\mu/50 = 0,1\mu \quad (14)$$

Im 8 bis 14 $\mu$  Spektralbereich hat man

$$\Delta\lambda = 6/50 = 0.12\mu \quad (15)$$

$$d = 11^2 / (0.12 \times 10) = 100\mu \quad (16)$$

und

$$d_2 - d_1 = 100[1 - 8/14] = 43\mu \quad (17)$$

Daher liegen die Stufen für die Dicke in der Größenordnung von 1 $\mu$ . Im sichtbaren Bereich 0,4 bis 0,8 $\mu$  ist  $\Delta\lambda = 0,008\mu$ , und daher

$$d = 0,6^2 / (0,008 \times 10) = 4,5\mu \quad (18)$$

Aus (18)

$$d_2 - d_1 = 4.5[1 - 1/2] = 2.25\mu \quad (19)$$

und daher sind die Stufen in d

$$2/50 = 0,04\mu \quad (20)$$

Zusammengefaßt schließen die wichtigen Merkmale im in Figur 3 dargestellten System ein: i) die besondere Übereinstimmung des Dickebereichs und der Feinheit des Interferometers mit der Größe der Detektorgruppe und mit der Anzahl der Detektoren sowie mit der Spektralaufösung; und ii) die Synchronisierung zwischen der Dickeabtastung und der Raumabtastung, um die spektrale und räumliche Information gleichzeitig während der Erstellungszeit eines Rahmens zu erhalten.

Es können viele andere Abtastungsaufbauten bestehen, die keine Synchronisation benötigen. In derartigen Aufbauten wird die Datenaufnahmesequenz von der Art der Signalabtastung der Detektorgruppe und davon abhängen, ob die Detektorgruppe, wie oben beschrieben, eindimensional oder zweidimensional ist. Es wird beabsichtigt, daß alle derartigen Aufbauten in den

Schutzumfang der vorliegenden Erfindung, wie sie beansprucht ist, fallen.

Es wird ersichtlich sein, daß, wenn das Interferometer der beweglichen Art wie in Figur 3 dargestellt verwendet wird, ein Strahl, der in Bezug auf die optische Achse bei einem kleinen Winkel ( $\Phi=0$ ) in das Interferometer eintritt, eine optische Wegdifferenz durchläuft, die als  $\Phi^2$  oder höhere Potenz von  $\Phi$  variiert. Die gesamte Spektralinformation in allen Bildpunkten kann durch das Abtasten der optischen Wegdifferenz synchron mit der Szenenabtastung aufgenommen werden, wonach jeder Bildpunkt mittels aller optischen Wegdifferenzen durch verschiedene Detektoren gemessen wurde. Durch eine sorgfältige Buchhaltung und die Anwendung einer geeigneten Matrixinversion (wie beispielsweise die Fourier-Transformation) kann das Spektrum eines jedes Bildpunktes berechnet werden. Die Buchhaltung ist erforderlich, da verschiedene Detektoren die Information verschiedener optischer Wegdifferenzen eines Bildpunktes zu verschiedenen Zeiten einsammeln. Solchermaßen kann im Zeitraum von 30 msek (die gewöhnliche Rahmenszeit eines Standardbildes) für jeden Bildpunkt eines Standard-Videorahmens ein Spektrum gemessen werden. Dieses liegt in der Größenordnung von 100 Auflösungspunkten pro Bildpunkt, mit einer typischen Matrix von 500 x 500 Bildpunkten pro Rahmen.

Im Aufbau aus Figur 4 kann die Erfindung anstelle der Verwendung eines Interferometers der beweglichen Art, worin die OPD (optische Wegdifferenz) variiert, indem ein Element im Interferometer bewegt wird (nämlich das Verändern des Abstands d zwischen den Plattenspiegeln im in Fig. 3 dargestellten Fabry-Perot-Interferometer), auch implementiert werden, indem sie ein Interferometer der unbeweglichen Art verwendet, wobei in diesem Fall die OPD mit dem Einfallswinkel der ankommenden Strahlung variiert. Figur 4 veranschaulicht die mittels der Verwendung des Interferometers der letzteren Art (nämlich mittels der Verwendung eines Interferometers des Michelsonstyps) implementierte Erfindung.

Auf diese Weise umfaßt das in Figur 4 dargestellte Interferometer einen Strahltrenner 40, der den Strahl aus dem

optischen Sammelsystem und Scanner (jeweils 31 und 32 in Figur 3) empfängt und den Strahl in zwei Wege aufteilt. Der Scanner 32 kann abhängig davon, ob die Detektorgruppe 36 zweidimensional oder eindimensional ist, jeweils eindimensional oder zweidimensional sein. Ein Weg schließt einen Kompensator 41 und einen Rückstrahler 42 ein, während der zweite Weg einen Kompensator 43 und einen Rückstrahler 44 einschließt. Die zwei Kompensatoren 41 und 43 sind identische Blöcke desselben Materials und derselben Dicke und werden antisymmetrisch in zwei Armen so positioniert, daß lediglich Strahlen kompensiert werden, die parallel zur optischen Achse verlaufen. Die zwei Rückstrahler 42 und 44 sind in gleichen Abständen vom Strahltrenner 40 positioniert. Der Strahltrenner 40 verfügt nur auf einem Abschnitt seiner Oberfläche an jeder Seite über einen halb-reflektierenden Überzug, so daß die Translation des Strahls durch den "Corner-Cube" ausgenutzt wird, um ein vollständig kompensiertes System für parallel zur optischen Achse verlaufende Strahlen zu erhalten.

Im in der Figur 4 dargestellten Interferometer des Michelsonstyps wird solchermaßen der parallel zur optischen Achse des Systems verlaufende Strahl zwischen den zwei Armen des Interferometers kompensiert, wohingegen die Strahlen, die in von der optischen Achse des Systems abweichenden Richtungen verlaufen, den OPDen (optischen Wegdifferenzen) zwischen den zwei Armen unterzogen werden, die linear mit dem Einfallswinkel variieren. Die Differenzen sind proportional zur Winkelabweichung von der optischen Achse.

Wenn daher die kollimierten Strahlen am Ausgang des Interferometers auf eine Detektorgruppe wie beispielsweise die Gruppe 36 in Figur 3 gebündelt werden, wird jedes Element der Gruppe Licht empfangen, das den verschiedenen OPDen zwischen den zwei Armen unterworfen wurde.

Mit dem Kompensator 41 parallel zum Strahltrenner 40 und dem Kompensator 42 senkrecht dazu, kann auf diese Weise gezeigt werden, daß die optische Wegdifferenz zwischen den zwei Armen für kleine  $\phi$ 's dem folgenden Verhältnis genügt:

$$\text{OPD}(\phi) = 2d \sin \phi_0 [1 - \cos \phi_0 / (n^2 - \sin^2 \phi_0)^{0.5}] \phi \quad (21)$$

wobei  $\phi_0$  = Winkel zwischen dem Strahlentrenner 40 und der optischen Achse ist. Aus Vereinfachungszwecken kann  $\phi_0$  als  $45^\circ$  angenommen werden, aber dies ist nicht wesentlich.  $n$  ist der Brechungsindex der zwei Kompensatoren 41 und 43,  $d$  ist die Kompensatordicke und  $\phi$  ist die Winkelabweichung von der optischen Achse.

Wenn beispielsweise die benötigte Änderung in der OPD zwischen zwei angrenzenden Detektoren  $\sim 1\mu$  und die Richtungsänderung zwischen den Bildfeldern der zwei benachbarten Detektoren  $\approx 1\text{mrad}$  ist, ergibt sich  $d$  in der Größenordnung von 1 mm. Tatsächlich ist

$$d = 1\mu / \{2(2)^{0.5}/2 [1 - ((2)^{0.5}/2)/(4-1/2)^{0.5}] 10^{-3}\} = 1\text{ mm}$$

Man beachte, daß man, wenn der Kompensator 41 entfernt und der Strahlentrenner 40 auf der ganzen Oberfläche an der Seite des ankommenden Strahles halb-reflektierend ist, einen anderen lebensfähigen Aufbau mit einer kompensierten optischen Achse erhält.

Mit Bezug auf die Spektralauflösung des Aufbaus aus Figur 4 soll man annehmen, daß der Spektralbereich der den Detektor erreichenden Strahlung begrenzt ist auf

$$\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$$

durch die Verwendung eines geeigneten Filters oder aufgrund der Übertragungseigenschaften der optischen Geräte.

Aufgrund des Nyquist-Abtasttheorems muß das Interferogramm zur Vermeidung der Faltung mit OPD-Stufen abgetastet werden, die nicht länger als  $\lambda_1/2$  sind. Aus Veranschaulichungsgründen kann man annehmen, daß dies ebenso die Differenz in der OPD ausmacht, die durch die zwei gegenüberliegenden Detektoren begrenzt wird. Da eine Periode eine OPD-Änderung einer Wellenlänge ist, muß die maximale Differenz in der von zwei angrenzenden Detektorelementen gesehenen OPD

$$\lambda_1/2$$

sein.

Man nehme jetzt an, daß die Einfallsstrahlung aus zwei Linien mit den Wellenzahlen  $v$  und  $v+\Delta v$  mit einer Stärke von  $I_0$  ist. Die resultierende Stärke für eine OPD von  $x$  ist:

$$I(x) = 0.5I_0(1 + 2\cos 2\pi vx) + 0.5I_0(1 + 2\cos 2\pi(v + \Delta v)x) \quad (23)$$

Wenn man den konstanten Term subtrahiert, erhält man

$$\begin{aligned} I(x) &= I(x) - I_0 \\ &= I_0[\cos(2\pi vx) + \cos \pi(v + \Delta v)x] \\ &= 2I_0 [2\pi(v + \Delta v)x] \cos \pi \Delta vx \end{aligned} \quad (24)$$

Ähnlich wie mit dem Rayleigh-Kriterium definiert man die zwei Linien als "aufgelöst", wenn das Verhältnis

$$I(x)/I(0)$$

kleiner als eine vorbestimmte Größe, sagen wir 0,9, ist. Dies ergibt eine Bedingung für den Maximalwert von  $x$ ,  $x_{\max}$ , die benötigt wird, um die definierte Auflösung zu erhalten.

Der Wert von  $x_{\max}$ , der der obigen Bedingung genügt, ist

$$\cos \pi \Delta vx_{\max} \leq 0.9 \quad (25)$$

oder

$$x_{\max} \geq 0.143/\Delta v \quad (26)$$

Unter der jetzigen Annahme, daß  $N_d$  die Gesamtanzahl der Detektoren in einer Gruppe ist, ist dann:

$$x_{\max} \geq N_d \lambda_1/2 \quad (27)$$

und

$$N_d \lambda_1/2 = 0.143/\Delta v \quad (28)$$

oder

$$\Delta v = 0.286/(\lambda_1 N_d) \quad (29)$$

Für  $v_2 = 1/\lambda_1$

$$\Delta v/v_2 = \Delta v \lambda_1 = (0.286/N_d)(\lambda_1/\lambda_2)$$

Als ein numerisches Beispiel:

wenn  $\lambda_1 = 5\mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 2\mu\text{m}$  und  $N_d = 100$

$$\Delta v/v_2 = 0.7\%$$

Zusammengefaßt wird die Einmaligkeit des in Figur 4 dargestellten Systems dargestellt durch: i) die OPD ist eine lineare Funktion des Einfallswinkels der ankommenden Strahlung auf das Interferometer, so daß verschiedene Detektoren der Gruppe sie als verschiedene optische Wegdifferenzen sehen. Diese Tatsache, verbunden mit der räumlichen Abtretung und der richtigen Buchhaltung, erlaubt, daß das Interferogramm bzw. die Fourier-Transformation des Spektrums eines jeden Bildpunktes gleichzeitig mit der Bildinformation gemessen wird. Wiederum kann das Abtasten im Falle des unbeweglichen Interferometers zweidimensional oder eindimensional sein, und zwar abhängig davon, ob die Detektorgruppe jeweils eindimensional oder zweidimensional ist.

Figur 5 veranschaulicht ein Abbildungsspektrometer, das ein Michelson-Interferometer, jedoch der beweglichen Art, ähnlich dem aus Figur 3, einschließt, nämlich worin die OPD mit der Bewegung eines Elements des Interferometers variiert. Im Spektrometer aus Figur 5 wird das Licht aus der Quelle 50 durch das optische Sammelsystem 51 gesammelt und auf einen Abtastspiegel 52 kollimiert, bevor es durch den Strahltrenner 53 hindurchgeführt wird, der den Strahl in zwei Arme aufteilt. Ein Arm umfaßt einen Kompensator 54 und einen Spiegel 55 und der zweite Arm schließt lediglich einen Spiegel 56 ein. Das Licht aus den zwei Spiegeln wird mithilfe des Strahltrenners 53 und einer Bündellinse 57 auf eine Gruppe von Detektoren 58 geführt.

Im in Figur 5 dargestellten Spektralabbildungsgerät ist, wenn die Detektorgruppe linear ist, die Richtung der Abtretung senkrecht zur Richtung der linearen Gruppe, und der Abtastspiegel 52 tastet die Szene in einer Dimension ab. Der Scanner 52 wird nicht benötigt, wenn die Detektorgruppe zweidimensional ist. Der Scanner 59a steuert den Abstand zwischen dem Spiegel 56 und dem Strahltrenner 53. Durch das Abtasten des Spiegels 56 auf die Weise des traditionellen Michelson-Interferometers, wird, während der Spiegel 55 unbeweglich ist, die OPD der zwei Arme gleichzeitig für alle

Bildpunkte in der Szene verändert. Der Kompensator 54 stellt sicher, daß der mittlere Strahl eine OPD aufweist, die Null gleicht. Viele unterschiedliche Abtastungsaufbauten und -abfolgen können möglich sein, einschließlich solcher, in denen die Synchronisierung nicht erforderlich ist, während der Bildscanner abhängig davon, ob die Detektorgruppe eindimensional oder zweidimensional ist, benötigt oder nicht benötigt wird.

Figur 6 stellt ein Abbildungsspektrometer dar, das in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung aufgebaut ist, das allerdings ein Interferometer anderer Art, nämlich ein modifiziertes Sagnac-Interferometer der unbeweglichen Art, verwendet, in dem die OPD in Zusammenhang mit dem Einfallswinkel der ankommenden Strahlung variiert. Wie oben unter Bezugnahme auf das in Figur 4 dargestellte Abbildungsspektrometer dargestellt, wird ein Strahl, der an einem kleinen Winkel zur optischen Achse in das Interferometer eintritt, einer OPD unterzogen, die linear mit diesem Winkel variiert.

Das im Spektrometer der Figur 6 dargestellte modifizierte Sagnac-Interferometer ist jenes in D.E. Hecht, Optics, Addison-Wesley Publishing Company, S. 359 (1987) beschriebene. In diesem Interferometer wird die gesamte Strahlung aus Quelle 60 in allen Bildpunkten von einem mechanischen Scanner 62 abgetastet, nachdem sie durch das optische Sammelsystem 61 kollimiert wurde. Das Licht wird dann durch einen Strahlentrenner 63 an einen ersten Reflektor 64 und dann an einen zweiten Reflektor 65 geführt, der das Licht durch den Strahltrenner 63 rück- und dann durch eine Bündelungslinse 66 an eine Gruppe von Detektoren 67 rückstrahlt. Dieser Strahl interferiert mit den Strahl, der durch 63, dann durch 65 und schließlich durch den Reflektor 64 rückgestrahlt wird. Mit einer eindimensionalen Gruppe wird eine zweidimensionale Abtastung benötigt, während mit einer zweidimensionalen Gruppe nur eine eindimensionale Abtastung erforderlich ist.

Am Ende einer Abtastung wurde jeder Bildpunkt mittels aller OPDen durch verschiedene Detektoren zu unterschiedlicher Zeit gemessen, und deshalb kann das Spektrum durch die Fourier-Transformation rekonstruiert werden. Ein parallel zur optischen



Achse verlaufender Strahl wird kompensiert, und ein Strahl an einem Winkel ( $\Phi$ ) zur optischen Achse unterläuft eine OPD, die eine Funktion der Dicke des Strahltrenners 63, seiner Brechungsindex und des Winkels  $\Phi$  ist. Die OPD ist für kleine Winkel proportional zu  $\Phi$ . Durch die Anlegung der richtigen Inversion und die sorgfältige Buchhaltung wird das Spektrum jedes Bildpunktes berechnet.

Auf Figur 6A Bezug nehmend, wird eine leicht modifizierte Version des Systems aus Figur 6 gezeigt, wobei der Strahl, einschließlich des mittleren Strahls auf der optischen Achse und anderer paralleler Strahlen an Nicht-Nullwinkeln in Bezug darauf innerhalb des Bildfeldes des Geräts, in das Interferometer eintritt und durch den Strahltrenner 63 in zwei kohärente Strahlen aufgespalten wird. Die zwei getrennten Strahlen werden wieder vereint, nachdem sie durch die Spiegel 64 und 65 gefaltet wurden, und erzeugen Interferenzmuster auf der Detektorgruppe 67, wo sie durch die Bündelungslinse 66 gebündelt werden.

Die verschiedenen hierin beschriebenen Aufbauten können wo nötig angepaßt werden, um verschiedene Beleuchtungsarten zu gestatten. Figur 6A kann verwendet werden, um dieses Konzept darzustellen. Im Falle einer Fluoreszenzstrahlung wird beispielsweise ein Laser oder eine UV-Lampe 68 verwendet, um die Quelle 60 zu beleuchten. Das eingeführte Fluoreszenzspektrum, das von der Quelle 60 ausgestrahlt wird, wird daraufhin durch das Spektralabbildungsgerät gemessen. Es sollte angemerkt werden, daß, da verglichen mit dem Einfallslight die Menge ausgestrahlten Lichtes in der Fluoreszenz für gewöhnlich relativ gering ist, ein Kerbfilter 69 vor die Detektorgruppe 67 oder in irgendeine andere geeignete Stellung angebracht wird.

Die Funktion des Kerbfilters 69 ist es, die gestreute oder die reflektierte Strahlung des Lasers bzw. der Lampe selbst zu sperren. Das Sperren ist nötig, um das Überfluten der Detektorgruppe 67 mit unerwünschten Signalen zu verhindern. Die Funktion des Kerbfilters 69 kann alternativ von jeder geeigneten Filterart erfüllt werden, die in der Lage ist, das reflektierte oder das Streulicht von der Lampe zu sperren. Im Falle einer UV-Lampe schließt die Lampe für gewöhnlich selbst einen Filter mit

einer Grenzfrequenz ein, der den Spektralbereich des auf den abgetasteten Gegenstand einfallenden Lichtes einschränkt. Da das Fluoreszenzlicht für gewöhnlich schwach ist, können zusätzlich gekühlte oder verstärkte Detektorgruppen verwendet werden, um den Rauschabstand der Messung zu erhöhen.

In der Raman-Spektroskopieanwendung ist die Lage abgesehen davon, daß ein Laser 68 verwendet wird, wie die mit der Fluoreszenz. Die Strahlungsquelle kann wie in Figur 6A für eine Reflexionsanalyse aufgestellt werden. Im Falle der Übertragungsanalyse würde die Strahlungsquelle hinter der Quelle 60, d. h. in Figur 6A links von der Quelle 60, angebracht werden.

Das Abtasten zwischen der Szene und den Streifen des Interferometers kann entweder durch die Verwendung eines Scanners, der sich außerhalb vom Interferometer befindet (bewegliche Szene) oder durch die Drehung des Interferometers selbst (beweglichen Streifen) durchgeführt werden. Dies kann besser unter Bezugnahme auf Figur 7 verstanden werden, wo ersichtlich ist, daß jeder Strahl, zum Beispiel der in der Figur gezeigte mittlere Strahl, der am Eingang des Sagnac-Interferometers um einen Winkel  $\theta$  gedreht wird, am Ausgang um denselben Winkel gedreht wird. Jedoch wird die OPD zwischen den entsprechenden getrennten Strahlen verändert.

Mit Bezug auf die Figur 8 läßt das Drehen des Sagnac-Interferometers um einen Winkel  $\theta$  auf ähnliche Weise den herausgehenden Strahl unbeweglich im Raum, ändert jedoch die OPD um dieselbe Größe wie zuvor.

In den Sagnac-Aufbauten der Figur 6 und Figur 6A passiert der Strahl, der um einen Winkel  $\beta$  ( $\beta = 60^\circ$  in Figur 6 und  $45^\circ$  in Figur 6A) auf den Strahltrenner einfällt, mit einer OPD = 0 durch das Interferometer, wohingegen ein Strahl, der bei einem allgemeinen Winkel  $\beta - \theta$  einfällt, einer folgendermaßen angegebenen OPD unterzogen wird:

$$OPD(\beta, \theta, t, n) = t[(n^2 - \sin^2(\beta + \theta))^{0.5} - (n^2 - \sin^2(\beta - \theta))^{0.5} + 2\sin\beta\sin\theta] \quad (30)$$

worin

$\beta$  = der Einfallswinkels des Strahls auf den Strahltrenner  
(60° in Figur 6 und 45° in Figur 6A)

$\theta$  = der Winkelabstand des Strahls von der optischen Achse  
bzw. dem Sagnac-Drehwinkel in Bezug auf die mittlere Stellung

$t$  = die Dicke des Strahltrenners

$n$  = der Brechungsindex des Strahltrenners

Die Gleichung (30) kann durch die lineare Gleichung approximiert werden:

$$\text{OPD}(\beta, \theta, t, n) = 2t \sin \beta [1 - (n^2 - \sin^2 \beta)^{-0.5} \cos \beta] \theta \quad (31)$$

Das nachstehend erläuterte ist auch für die Aufbauten aus Figur 4 und die Gleichung (21) gültig.

Aus der Gleichung (30) folgt, daß - durch das Abtasten von sowohl dem positiven als auch negativen Winkel in Bezug auf die zentrale Stellung - für jeden Bildpunkt ein doppelseitiges Interferogramm erhalten werden kann, das zur Beseitigung des Phasenfehlers dient und genauere Ergebnisse in der Fourier-Transformationsberechnung gibt. Die Abtastamplitude bestimmt die erreichte maximale OPD, die auf die Spektralauflösung der Messung bezogen ist. Die Größe der Winkelstufen bestimmt die OPD-Stufe, die wiederum durch die kürzeste Wellenlänge vorgegeben wird, auf die das System anfällig ist. Tatsächlich muß diese OPD-Stufe gemäß des Nyquisttheorems kleiner als die Hälfte der kürzesten Wellenlänge sein, auf die das System anfällig ist.

Ein weiterer Parameter, der in Betracht gezogen werden sollte, ist die finite Größe des Detektorelements in der Matrix. Durch das optische Bündelungsgerät liegt das Element einer finiten OPD im Sagnac-Interferometer gegenüber, was das Falten des Interferogramms mit einer rechtwinkligen Funktion bewirkt. Dies bewirkt als eine Folge davon eine Reduktion der Systemempfindlichkeit bei kurzen Wellenlängen, die für Wellenlängen, die gleich oder unter der OPD liegen, die dem Element gegenüberliegt, auf Null fallen. Aus diesem Grund muß sichergestellt werden, daß die Modulations-Übertragungs-Funktions-(MTF)-Bedingung erfüllt wird, d. h. daß das der OPD

gegenüberliegende Detektorelement im Interferometer kleiner sein muß als die kürzeste Wellenlänge, auf die das Gerät empfindlich ist.

Figur 9 veranschaulicht ein zusätzliches Abbildungsspektrometer, das ein Michelson-Interferometer der beweglichen Art, ähnlich dem in Figur 5 veranschaulichten, einschließt, das allerdings so aufgebaut ist, daß das Licht durch die Mikroskopobjektive auf die Reflektoren gebündelt wird. Solchermaßen schließt das in Figur 9 dargestellte Spektrometer eine Lichtquelle 71 und ein optisches Mikroskopsystem 72 ein, das zum Bündeln auf den Gegenstand 72b eine Kondensorlinse 72a einschließt. Das optische System 72 schließt weiterhin eine Kollimatorlinse 72c ein, um das Licht durch einen Scanner 73, durch einen Strahlentrenner 74 an zwei Reflektoren 75 und 76, und dann durch eine Bündelungslinse 77 auf eine Detektorgruppe zu 78 richten. Die Detektorgruppe 78 im Aufbau der Figur 9 sowie in den zuvor beschriebenen Aufbauten kann eine CCD (charge coupled device - Ladungsgekoppelte Vorrichtung) sein.

Der Scanner 73 tastet das Bildfeld in einer Dimension ab, wenn die Detektorgruppe eindimensional ist. Es ist überhaupt nicht erforderlich, wenn die Detektorgruppe zweidimensional ist. Der Reflektor 75 und das Mikroskopsystem bewegen sich zusammen an der optischen Achse entlang, um das Abtasten der OPD synchron mit dem Scanner 73 (falls vorhanden) bereitzustellen, wie oben mit Bezug auf Figur 5 beschrieben wurde.

Wie oben beschrieben, kann die OPD für jeden Bildpunkt auf zwei Arten abgetastet werden:

(1) Ein Interferometer der unbewegliche Art wird verwendet, in dem das Interferometer in einer unbeweglichen Stellung gehalten und die Szene mit einem optischen Scanner abgetastet wird. Da jeder Detektor in der Detektorgruppe in einer Stellung an der Brennebene sitzt, von wo er die Strahlung mittels einer festen OPD sieht, wobei die OPD von Detektor zu Detektor variiert, gewährleistet das Abtasten der Szene, daß jeder Bildpunkt von allen Detektoren gesehen wird und daher mittels aller OPDen am Ende der Abtretung gesehen wird. Am Ende der Abtretung kann die Fourier-Transformation in Bezug auf jeden

Bildpunkt eingesetzt werden; und

(2) Ein Interferometer der beweglichen Art wird verwendet, worin die Szene unbeweglich gehalten und ein Element im Interferometer oder das ganze Interferometer selbst auf solche Weise abgetastet wird, daß jetzt jeder Detektor denselben Bildpunkt sieht, allerdings durch verschiedenen OPDen zu verschiedener Zeit. Am Ende der Abtretung werden alle Bildpunkte durch alle OPDen gemessen worden sein. Die Fourier-Transformation kann daher in Bezug auf die von jedem Detektor gemessene Signalfunktion eingesetzt werden.

Wo der Detektor eine lineare Gruppe bildet, muß eine eindimensionale optische Abtretung der Szene zu der Interferometerabtastung hinzugefügt werden, sofern die ganze Szene analysiert werden soll. Im Falle eines Zeilenscanners (wo die Szene anstatt einer Fläche eine Linie ist, ist, wenn man vom Interferometer absieht, keine zusätzliche optische Abtretung erforderlich; jedoch gibt es viele Arbeitsaufbauten, die von den Ausmaßen der Detektorgruppe und von der verwendeten Interferometerart abhängen.

Die Entscheidung, welches Verfahren vorzuziehen ist, sollte in jedem Fall auf den spezifischen Erfordernissen und geometrischen Einschränkungen beruhen. Im Verfahren (1) wird zum Beispiel die Spektralauflösung durch die Anzahl der Detektoren und durch den von der Geometrie der Einrichtung gestatteten gesamten OPD-Bereich eingeschränkt. Im Verfahren (2) ist es abhängig von der verwendeten Interferometerart möglich, alle OPDen zu erreichen. Da die erhaltbare Spektralauflösung höher ist, wenn eine höhere maximale OPD abgetastet wird, ist es klar, daß das zweite Verfahren geeigneter ist, wenn eine hohe Auflösung benötigt wird.

Die Ausführungsformen der Figuren 10-15 basieren auf das zweiten Verfahren, nämlich dem, worin die Szene unbeweglich und die OPD-Abtretung durch ein bewegliches Element des Interferometers oder ein Interferometer selbst durchgeführt wird, und auf ein drittes Verfahren, das auf ein unbewegliches Interferometer mit einem zusätzlichen kompensierenden Scannerspiegel (ein- oder zweiseitig) basiert, um die Szene unbeweglich zu halten und die

Interferenzstreifen quer durch die Szene abzutasten. Im zweiten und dritten Verfahren wird das Licht durch ein Interferometer der beweglichen Art geführt, in dem die OPD verändert wird, um das Licht durch eine Bewegung eines Elements des Interferometers oder eines kompensierenden Spiegels oder des Interferometers selbst derart zu modulieren, daß zu jedem Zeitpunkt jeder Detektor eine lineare Kombination (Fourier-Transformation) des Spektralinhalts des Lichtes sieht, das von jedem Bildpunkt ausgestrahlt wird, und er auf einen anderen Bildpunkt der Szene schaut, und daß, wenn der Scanner eine Abtretung abschließt, die ganze Szene an allen wichtigen Kombinationen des Spektralinhalts abgetastet worden sein wird.

In all diesen Verfahren muß die Szene dennoch in einer Dimension abgetastet werden, wenn die Detektorgruppe linear ist.

In den Zeichnungen veranschaulichen die Figuren 10-15 weitere Implementierungen des zweiten Verfahrens und zwei Implementierungen des dritten Verfahrens, d. h. worin die Szene fest gehalten und die Interferenzstreifen quer durch die Szene abgetastet werden.

Figur 10 veranschaulicht ein Abbildungsspektrometer einer Art, die dem in Figur 6 gezeigten modifizierten Sagnac-Interferometer abgesehen davon ähnelt, daß es eher als dem Verfahren (1) oben, worin die Abtretung durch das Abtasten des Bildes durchgeführt wird, auf das oben beschriebene Verfahren (2) basiert, nämlich dem Durchführen der Abtretung durch ein bewegliches Element des Interferometers.

Solchermaßen gleicht das in Figur 10 dargestellte Abbildungsspektrometer dem in Figur 6 dargestellten darin, daß es eine optische Bildquelle 110 einschließt, in der die gesamte Spektralinformation in all ihren Bildpunkten durch einen mechanischen Scanner 112 abgetastet wird, nachdem sie durch das optische Sammelsystem 111 kollimiert wird. Dieser Scanner wird nur benötigt, wenn die Detektorgruppe linear ist. Wenn sie zweidimensional ist, wird er nicht benötigt. Das Licht wird dann durch einen Strahlentrenner 113 auf einen ersten Reflektor 114 und dann auf einen zweiten Reflektor 115 hindurchgeführt, der das Licht zurück durch den Strahltrenner 113 und dann durch eine

Bündelungslinse 116 auf eine Detektorgruppe 117 reflektiert. Im in Figur 10 dargestellten Gerät wird der Strahltrenner 113 um eine Achse herum gedreht, die senkrecht zum optischen Weg (und senkrecht zum Blatt) steht, um die Abtretung durchzuführen. Auf diese Weise verändert diese Drehung die OPD, wodurch ein kollimierter Strahl von einem Bildpunkt einen spezifischen Detektor erreicht, ohne den Detektor zu verändern, auf den er gebündelt wird. Es ist somit klar, daß eine Abtretung des Strahltrennerwinkels in Bezug auf die optische Achse bewirkt, daß jeder Bildpunkt durch einen OPD-Bereich abgetastet wird.

Wenn man solchermaßen im Verfahren (2) oben (wobei die Abtretung durch das Interferometer erfolgt) auf die Brennebene schaut, wo der Detektor aufgestellt ist, kann man sehen, daß das Bild der Szene auf einer Reihe beweglicher Interferenzstreifen überlagert ist bzw. abhängig von der Art des Interferometers zwischen einer dunklen und hellen Szene wechselt. Im Verfahren (1) oben (das Szenenabtastungsverfahren) kann man sehen, daß, wenn sich der optische Scanner bewegt, das Bild der Szene durch die Brennebene abtastet, während die Streifen unbeweglich auf dieser Ebene bleiben. Daher geht jeder Punkt auf der Szene durch Stellen an der Brennebene, die verschiedenen OPD'en entsprechen. Am Ende einer Abtretung wird die gesamte erforderliche Information für jeden Bildpunkt eingesammelt. Die Ergebnisse der zwei Verfahren sind daher ähnlich, aber die Anordnungen auf der Grundlage des zweiten Verfahrens stellen wie oben beschrieben eine Reihe von Vorteilen bereit.

Figur 11 veranschaulicht ein Abbildungsspektrometer, das dem aus Figur 10 bzw. dem aus Figur 6 abgesehen davon gleicht, daß es eine optische Platte 128 eines lichtdurchlässigen Materials einschließt, das die maximale OPD erhöht und dadurch die Spektralauflösung des Geräts erhöht. In diesem Fall befindet sich die optische Platte 128 zwischen dem Strahltrenner 123 und dem zweiten Reflektor 125, der das Licht aus dem ersten Reflektor 124 zurück durch den Strahltrenner 123 und dann durch eine Bündelungslinse 126 auf die Detektorgruppe 127 reflektiert.

Figur 12 stellt ein Abbildungsspektrometer dar, das dem der Figur 11 gleicht, abgesehen von einer etwas anderen Ausrichtung

des ersten Reflektors 134, des zweiten Reflektors 135, der optischen Platte 138, des Strahltrenners 133 und der Detektorgruppe 137 einschließlich ihrer Bündelungslinse 136.

Figur 13 veranschaulicht ein Abbildungsspektrometer, das ein Interferometer der Michelsonart einschließt, das dem aus der Figur 5 ähnelt. In diesem Fall wird jedoch eine zweidimensionale Detektorgruppe 147 verwendet, weshalb - eher als eine zweidimensionale Abtretung wie im in Figur 5 dargestellten Gerät - auch eine eindimensionale Abtretung ausreicht. Solchermaßen wird in Figur 13 die Abtretung durch den vom Scanner 149a gesteuerten Spiegel 146 durchgeführt, um den Abstand zwischen dem Spiegel und dem Strahltrenner 143 zu verändern und dadurch die OPD zu ändern. Auf diese Weise erübrigt das in Figur 13 dargestellte System das Erfordernis der in Figur 5 eingeschlossenen Synchronisationsschaltung 59 und des Abtastspiegels 52.

Die Figuren 14 und 15 veranschaulichen zwei weitere Ausführungsformen der Erfindung, die gegenüber der in Figur 10 dargestellten Ausführungsform für Vorteile sorgt. Solchermaßen variiert im in Figur 10 dargestellten Gerät, das auf das Sagnac-Interferometer mit dem drehenden Strahltrenner basiert, der Abstand zwischen den Streifen als eine Funktion des Strahltrennerwinkels. Dies macht den Transformationsalgorithmus kompliziert und für die Verwendung schwierig. In den in den Figuren 14 und 15 dargestellten Ausführungsformen tasten jedoch die Streifen das Bild ab, ohne den Abstand zwischen ihnen zu verändern. Auf diese Weise wird ein konstanter Streifenabstand erhalten, mit der Möglichkeit des Erreichens einer höheren Spektralauflösung und eines einfacheren Algorithmus.

Figur 14 veranschaulicht ein Gerät auf der Grundlage des Sagnac-Interferometers einschließlich eines Abtastspiegels 152 und eines Strahltrenners 153. In diesem Fall wird eher der Abtastspiegel 152 als der Strahltrenner 143 um eine Achse herum gedreht, die senkrecht zum optischen Weg (und senkrecht zur Ebene des Blattes) steht, um die Abtretung durchzuführen. Wie in Figur 14 gezeigt, ist der Spiegel 152 ein doppelseitiger Spiegel.

Figur 15 veranschaulicht eine ähnliche Anordnung wie in



Figur 14, wenn man davon absieht, daß der Abtastspiegel 162 einseitig ist, und er wird gedreht wie der Spiegel 152 in Figur 14, um die OPD-Abtretung mithilfe des Strahltrenners 163 durchzuführen.

In den Figuren 14 und 15 bewegt sich das Interferometer nicht, arbeitet jedoch aufgrund der besonderen Anordnung der Abtastspiegel wie im bewegten Fall.

Weitere Änderungen, Modifikationen und Anwendungen der Erfindung werden offensichtlich sein.

Es wird solchermaßen ersichtlich, daß in Übereinstimmung mit der vorliegenden Erfindung aufgebaute Spektrometer nicht bloß die von jedem Bildpunkt im Bildfeld ankommende Lichtstärke mißt, sondern auch das Spektrum eines jeden Bildpunktes in einem vorab definierten Wellenlängenbereich mißt. Sie verwenden auch besser die durch jeden Bildpunkt im Bildfeld zu jedem Zeitpunkt ausgestrahlte Strahlung und erlauben daher eine beträchtliche Kürzung in der Rahmenszeit und/oder einen bedeutsamen Anstieg in der Empfindlichkeit des Spektrometers. Derartige Abbildungsspektrometer können andere Arten von Interferometern und optischen Sammel- und Bündelungssystemen einschließen und können in einer großen Anzahl von Anwendungen einschließlich medizinischer diagnostischer Anwendungen, Fernabtastung für geologische und landwirtschaftliche Untersuchungen und dergleichen verwendet werden.

Obwohl die Erfindung in Bezug auf eine begrenzte Anzahl von Ausführungsformen beschrieben wurde, wird es geschätzt sein, daß viele Änderungen, Modifikationen und weitere Anwendungen der Erfindung innerhalb des Schutzzumfangs der Ansprüche vorgenommen werden können.

# ANSPRÜCHE

1. Ein Verfahren zum Analysieren eines optischen Bildes einer Szene, um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon zu bestimmen, das folgendes umfaßt:

- (a) das Sammeln einfallenden Lichtes aus der Szene;
- (b) das Führen des Lichtes durch ein Interferometer (24), das ein moduliertes Licht ausgibt, das einem vorbestimmten Satz von linearen Kombinationen der Spektralstärke des von jedem Bildpunkt ausgestrahlten Lichtes entspricht;

(c) das Bündeln des vom Interferometer (24) ausgegebenen Lichtes auf eine zweidimensionale Detektorgruppe (26); und

(d) das Verarbeiten der Ausgabe der Detektorgruppe (26), um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon zu bestimmen;

wobei das Interferometer (24) der drehenden Art ist, in der die optische Wegdifferenz verändert wird, um das Licht zu modulieren, indem das Interferometer (24) oder ein Element des Interferometers (24) gedreht wird, so daß zu jedem Zeitpunkt jeder Detektor (26) einen verschiedenen Punkt der Szene sieht und sein Signal eine lineare Kombination des Spektralinhalts des von jedem Bildpunkt kommenden Lichtes ist, und daß, wenn der Scanner eine Interferometerabtastung abschließt, die Szene an allen relevanten linearen Kombinationen des Spektralinhalts abgetastet worden sein wird.

2. Ein Verfahren zum Analysieren eines optischen Bildes einer Szene, um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon zu bestimmen, das folgendes umfaßt:

- (a) das Sammeln einfallenden Lichtes aus der Szene;
- (b) das Abtasten des gesammelten Lichtes in einer Dimension;

(c) das Führen des Lichtes durch ein Interferometer (24), das ein moduliertes Licht ausgibt, das einem vorbestimmten Satz von linearen Kombinationen der Spektralstärke des von jedem Bildpunkt ausgestrahlten Lichtes entspricht;

(d) das Bündeln des vom Interferometer (24) ausgegebenen

Lichtes auf eine eindimensionale Detektorgruppe; und

(e) das Verarbeiten der Ausgabe der Detektorgruppe, um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon zu bestimmen;

wobei das Interferometer (24) der drehenden Art ist, in der die optische Wegdifferenz verändert wird, um das Licht zu modulieren, indem das Interferometer (24) oder ein Element des Interferometers (24) gedreht wird, so daß zu jedem Zeitpunkt jeder Detektor einen verschiedenen Punkt der Szene sieht und sein Signal eine lineare Kombination des Spektralinhalts des von jedem Bildpunkt kommenden Lichtes ist, und daß, wenn der Scanner eine Interferometerabtastung und eine Szenenabtastung abschließt, die Szene an allen relevanten linearen Kombinationen des Spektralinhalts abgetastet worden sein wird.

3. Ein Gerät zum Analysieren eines optischen Bildes einer Szene, um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon zu bestimmen, das folgendes umfaßt:

(a) ein Mittel (20) zum Sammeln des einfallenden Lichtes aus der Szene;

(b) ein Interferometer (24);

(c) ein Mittel (33, 34), um das Licht derart durch das Interferometer (24) zu führen, daß es modulierte Licht ausgibt, das einem vorbestimmten Satz von linearen Kombinationen der Spektralstärke des von jedem Bildpunkt ausgestrahlten Lichtes entspricht;

(d) eine zweidimensionale Detektorgruppe (26);

(e) ein Mittel (35) zum Bündeln des vom Interferometer (24) ausgegebenen Lichtes auf die Detektorgruppe (26); und

(f) ein Mittel (28) zum Verarbeiten der Ausgabe der Detektorgruppe (26), um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon zu bestimmen;

wobei das Interferometer (24) der drehenden Art ist, in der die optische Wegdifferenz verändert wird, um das Licht zu modulieren, indem das Interferometer (24) oder ein Element des Interferometers (24) gedreht wird, so daß zu jedem Zeitpunkt jeder Detektor (26) einen verschiedenen Punkt der Szene sieht und sein Signal eine lineare Kombination des Spektralinhalts des

von jedem Bildpunkt kommenden Lichtes ist, und daß, wenn der Scanner eine Interferometerabtastung abschließt, die Szene an allen relevanten linearen Kombinationen des Spektralinhalt abgetastet worden sein wird.

4. Ein Gerät zum Analysieren eines optischen Bildes einer Szene, um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon zu bestimmen, das folgendes umfaßt:

- (a) ein Mittel (20) zum Sammeln des einfallenden Lichtes aus der Szene;
- (b) ein Mittel (22) zum Abtasten des gesammelten Lichtes in einer Dimension;
- (c) ein Interferometer (24);
- (d) ein Mittel (33, 34), um das Licht derart durch das Interferometer (24) zu führen, daß es modulierte Licht ausgibt, das einem vorbestimmten Satz von linearen Kombinationen der Spektralstärke des von jedem Bildpunkt ausgestrahlten Lichtes entspricht;
- (e) eine eindimensionale Detektorgruppe (26);
- (f) ein Mittel (35) zum Bündeln des vom Interferometer (24) ausgegebenen Lichtes auf die Detektorgruppe; und
- (g) ein Mittel (28) zum Verarbeiten der Ausgabe der Detektorgruppe (26), um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon zu bestimmen;

wobei das Interferometer (24) der drehenden Art ist, in der die optische Wegdifferenz verändert wird, um das Licht zu modulieren, indem das Interferometer (24) oder ein Element des Interferometers (24) gedreht wird, so daß zu jedem Zeitpunkt jeder Detektor (26) einen verschiedenen Punkt der Szene sieht und sein Signal eine lineare Kombination des Spektralinhalt des von jedem Bildpunkt ausgestrahlten Lichtes ist, und daß, wenn der Scanner eine Interferometerabtastung und eine Szenenabtastung abschließt, die Szene an allen relevanten linearen Kombinationen des Spektralinhalt abgetastet worden sein wird.

5. Ein Verfahren zum Analysieren eines optischen Bildes einer Szene, um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon

zu bestimmen, das folgendes umfaßt:

- (a) das Sammeln des einfallenden Lichtes aus der Szene;
  - (b) das Führen des Lichtes durch ein Interferometer (24), das modulierte Licht ausgibt, das einem vorbestimmten Satz von linearen Kombinationen der Spektralstärke des von jedem Bildpunkt ausgestrahlten Lichtes entspricht;
  - (c) das Bündeln des vom Interferometer (24) ausgegebenen Lichtes auf eine zweidimensionale Detektorgruppe (26); und
  - (d) das Verarbeiten der Ausgabe der Detektorgruppe (26), um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon zu bestimmen;
- wobei das Interferometer (24) der unbeweglichen Art ist, in der die optische Wegdifferenz mit dem Einfallswinkel des ankommenden Lichtes verändert wird, um das Licht zu modulieren, so daß zu jedem Zeitpunkt jeder Detektor (26) einen verschiedenen Punkt der Szene sieht und sein Signal eine verschiedene lineare Kombination des Spektralinhalt der verschiedenen Punkte der Szene ist, und daß, wenn der Scanner eine Abtretung abschließt, die Szene an allen relevanten linearen Kombinationen des Spektralinhalt der Szene abgetastet worden sein wird; wobei das Verfahren weiterhin den folgenden Schritt umfaßt:

- (e) das Abtasten des Lichtes in einer Dimension, bevor das Licht durch das Interferometer (24) geführt wird.

6. Ein Verfahren zum Analysieren eines optischen Bildes einer Szene, um die Spektralstärke eines Bildpunktes davon zu bestimmen, das folgendes umfaßt:

- (a) das Sammeln einfallenden Lichtes aus der Szene;
- (b) das Abtasten des gesammelten Lichtes in zwei Dimensionen;
- (c) das Führen des abgetasteten Lichtes durch ein Interferometer (24), das das modulierte Licht ausgibt, das einem vorbestimmten Satz linearer Kombinationen der Spektralstärke des von jedem Bildpunkt ausgestrahlten Lichtes entspricht;
- (d) das Bündeln des vom Interferometer (24) ausgegebenen Lichtes auf eine eindimensionale Detektorgruppe (26); und
- (e) das Verarbeiten der Ausgabe aus der Detektorgruppe

(26), um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon zu bestimmen;

wobei das Interferometer (24) der unbeweglichen Art ist, in der die optische Wegdifferenz mit dem Einfallswinkel des ankommenden Lichtes verändert wird, um das Licht zu modulieren, so daß zu jedem Zeitpunkt jeder Detektor einen verschiedenen Punkt der Szene und eine verschiedene lineare Kombination des Spektralinhalts der verschiedenen Punkte der Szene sieht, und daß, wenn der Scanner die Abtretung einer Szene abschließt, die ganze Szene an allen relevanten linearen Kombinationen des Spektralinhalts der Szene abgetastet worden sein wird.

7. Ein Gerät zum Analysieren eines optischen Bildes einer Szene, um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon zu bestimmen, das folgendes umfaßt:

(a) ein Mittel (20) zum Sammeln des einfallenden Lichtes aus der Szene;

(b) ein Interferometer (24);

(c) ein Mittel (41, 42, 43, 44), um das Licht derart durch das Interferometer (24) zu führen, daß es modulierte Licht ausgibt, das einem vorbestimmten Satz von linearen Kombinationen der Spektralstärke des von jedem Bildpunkt ausgestrahlten Lichtes entspricht;

(d) eine zweidimensionale Detektorgruppe (26);

(e) ein Mittel (40) zum Bündeln des vom Interferometer (24) ausgegebenen Lichtes auf die Detektorgruppe (26); und

(f) ein Mittel (28) zum Verarbeiten der Ausgabe der Detektorgruppe (26), um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon zu bestimmen;

wobei das Interferometer (24) der unbeweglichen Art ist, in der die optische Wegdifferenz mit dem Einfallswinkel des ankommenden Lichtes verändert wird, um das Licht zu modulieren, so daß zu jedem Zeitpunkt jeder Detektor (26) einen verschiedenen Punkt der Szene sieht und sein Signal eine verschiedene lineare Kombination des Spektralinhalts der verschiedenen Punkte der Szene ist, und daß, wenn der Scanner eine Abtretung abschließt, die Szene an allen relevanten

linearen Kombinationen des Spektralinhalts der Szene abgetastet worden sein wird; wobei das Gerät weiterhin folgendes umfaßt:

(g) ein Mittel (62) zum Abtasten des Lichtes in einer Dimension, bevor das Licht durch das Interferometer geführt wird.

8. Ein Gerät zum Analysieren eines optischen Bildes einer Szene, um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon zu bestimmen, das folgendes umfaßt:

(a) ein Mittel (20) zum Sammeln des einfallenden Lichtes aus der Szene;

(b) ein Mittel (22) zum Abtasten des gesammelten Lichtes in zwei Dimensionen;

(c) ein Interferometer (24);

(d) ein Mittel (41, 42, 43, 44), um das Licht derart durch das Interferometer (24) zu führen, daß es modulierte Licht ausgibt, das einem vorbestimmten Satz von linearen Kombinationen der Spektralstärke des von jedem Bildpunkt ausgestrahlten Lichtes entspricht;

(e) eine eindimensionale Detektorgruppe (26);

(f) ein Mittel (40) zum Bündeln des vom Interferometer (24) ausgegebenen Lichtes auf die Detektorgruppe (26); und

(g) ein Mittel zum Verarbeiten der Ausgabe der Detektorgruppe, um die Spektralstärke eines jeden Bildpunktes davon zu bestimmen;

wobei das Interferometer (24) der unbeweglichen Art ist, in der die optische Wegdifferenz mit dem Einfallswinkel des ankommenden Lichtes verändert wird, um das Licht zu modulieren, so daß zu jedem Zeitpunkt jeder Detektor (26) einen verschiedenen Punkt der Szene und eine verschiedene lineare Kombination des Spektralinhalts der verschiedenen Punkte der Szene sieht, und daß, wenn der Scanner die Abtastung einer Szene abschließt, die ganze Szene an allen relevanten linearen Kombinationen des Spektralinhalts der Szene abgetastet worden sein wird.

9. Das Verfahren nach den Ansprüchen 1, 2, 5 oder 6, worin

das Sammeln des einfallenden Lichtes durch die Verwendung eines Teleskops durchgeführt wird.

10. Das Verfahren nach den Ansprüchen 1, 2, 5 oder 6, worin das Sammeln des einfallenden Lichtes durch die Verwendung eines Mikroskops durchgeführt wird.

11. Das Gerät aus den Ansprüchen 3, 4, 7 oder 8, worin das Mittel (20) zum Sammeln des einfallenden Lichtes aus der Szene ein Teleskop einschließt.

12. Das Gerät aus den Ansprüchen 3, 4, 7 oder 8, worin das Mittel (20) zum Sammeln des einfallenden Lichtes aus der Szene ein Mikroskop einschließt.



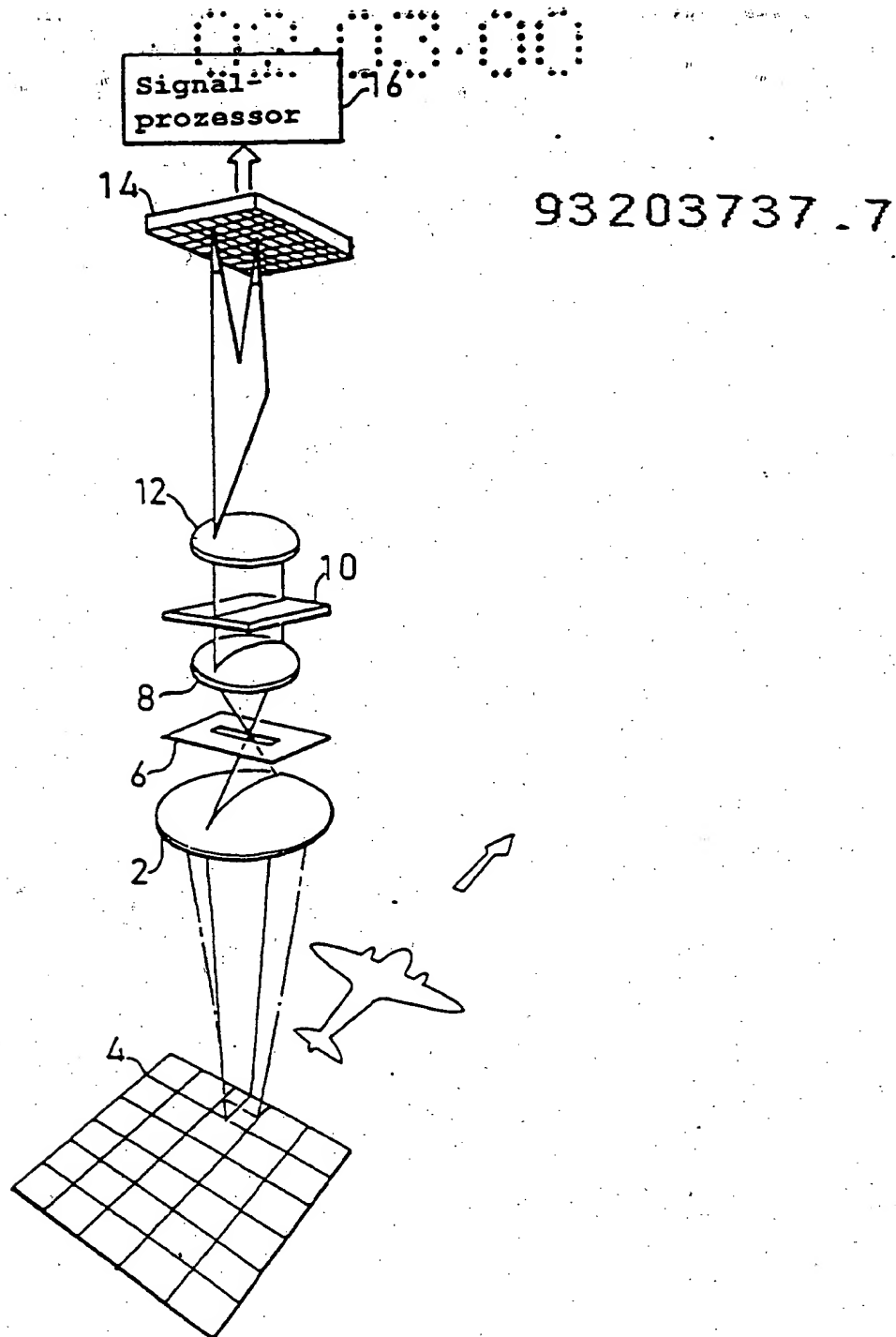


FIG. 1 (Stand der Technik)

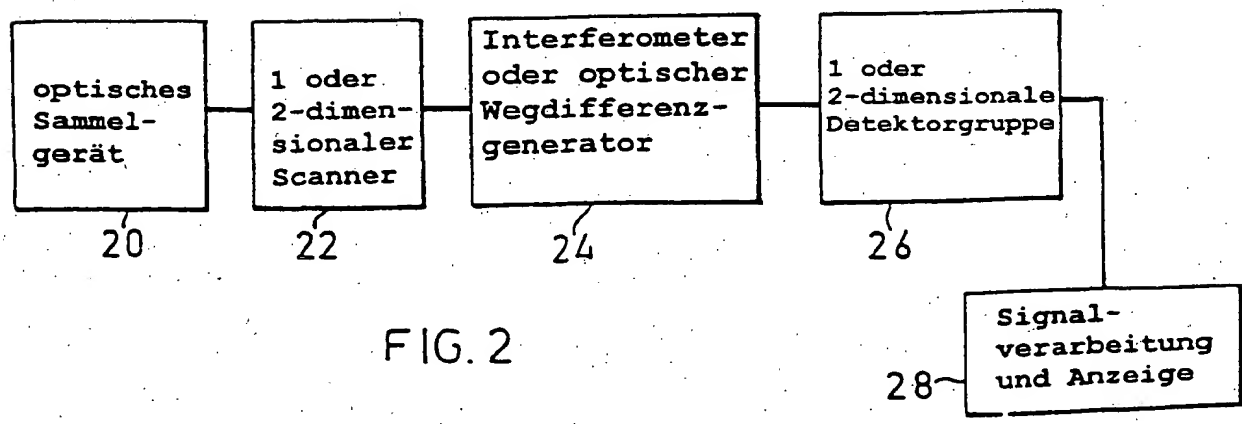


FIG. 2

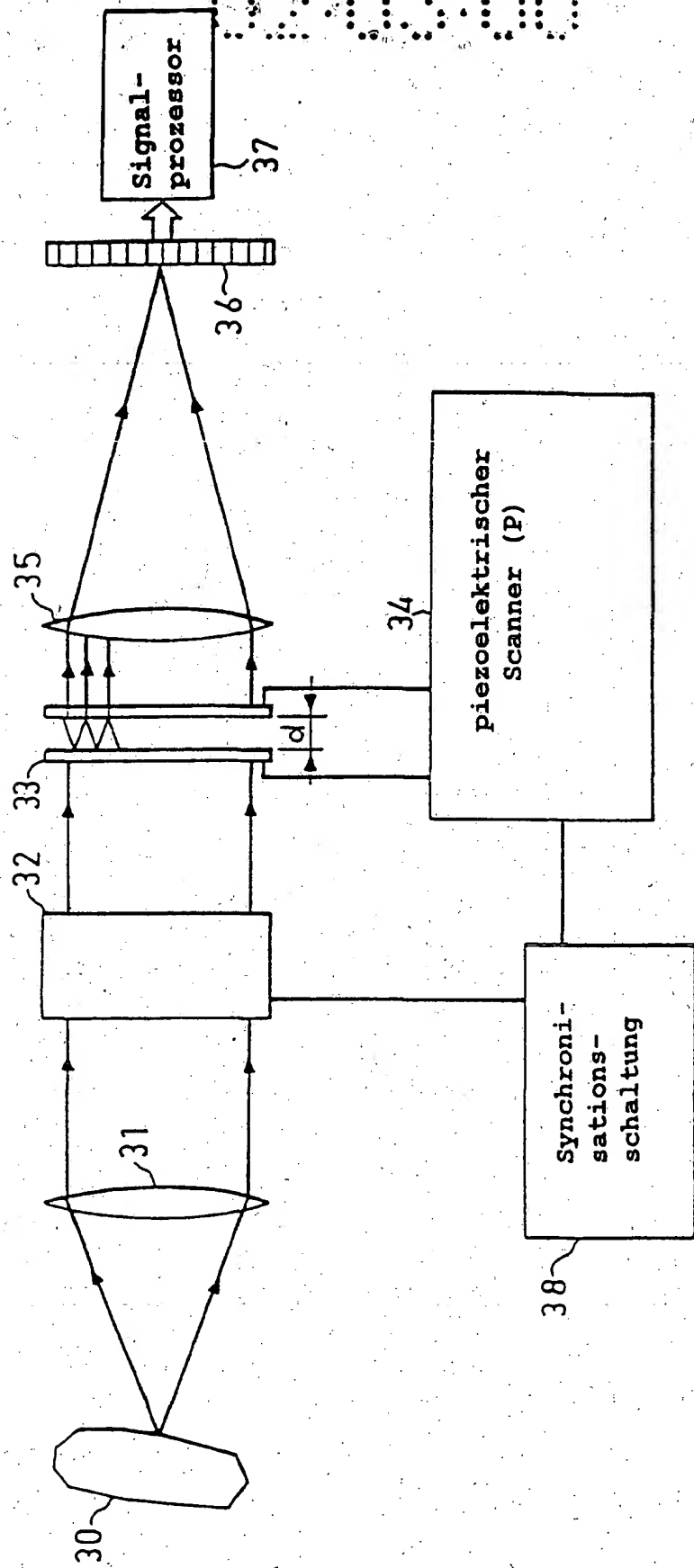


FIG. 3

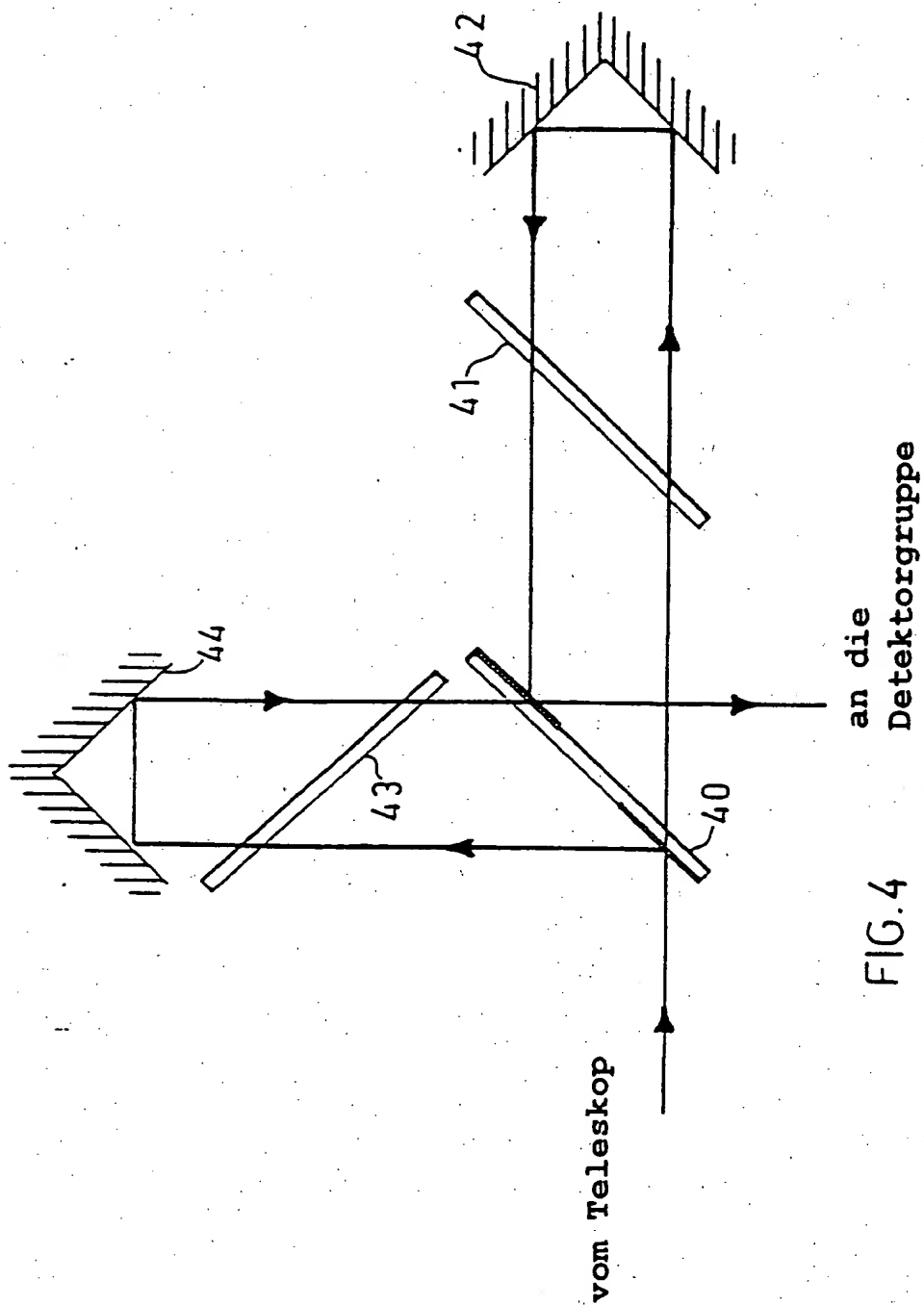


FIG. 4

000000

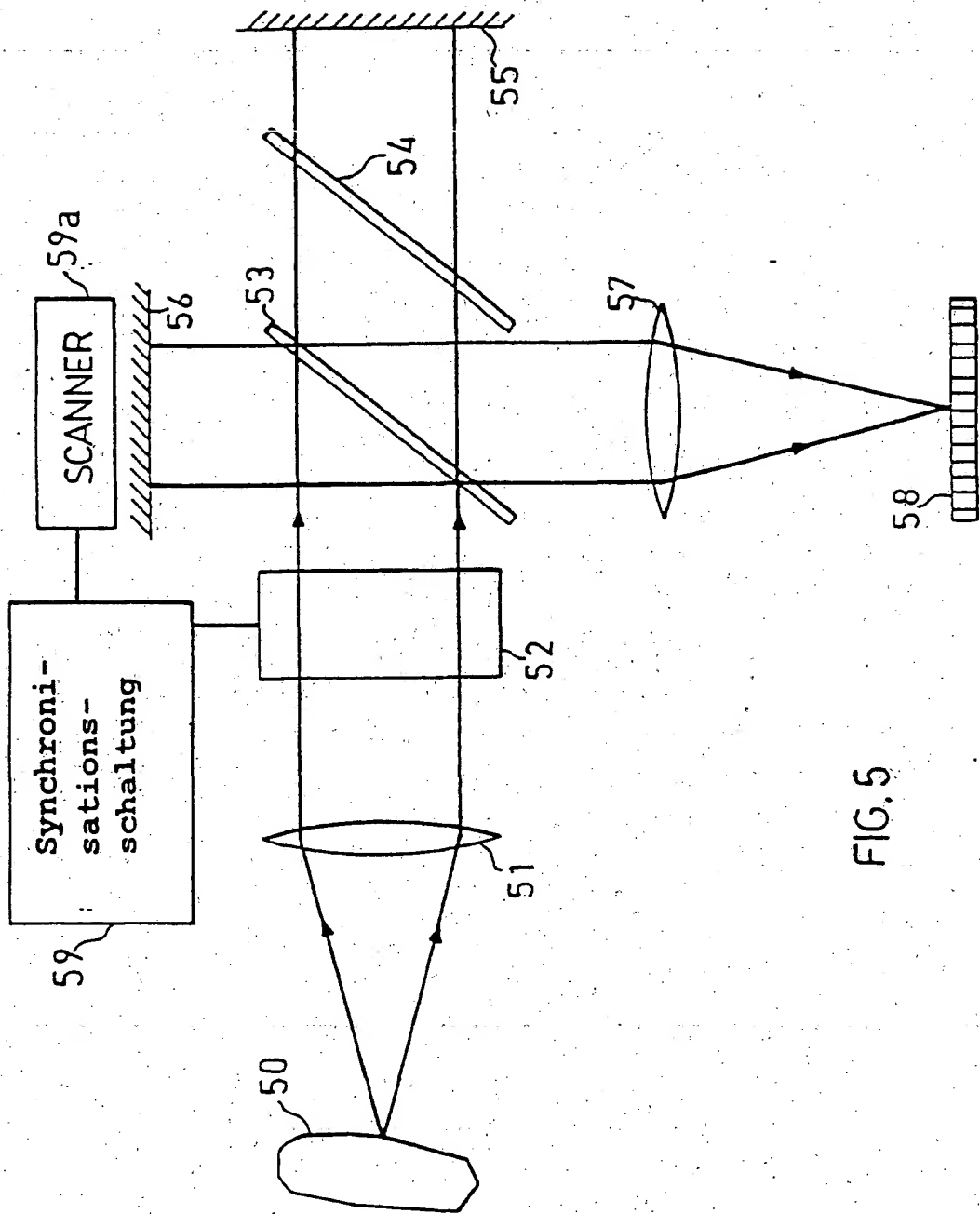


FIG. 5

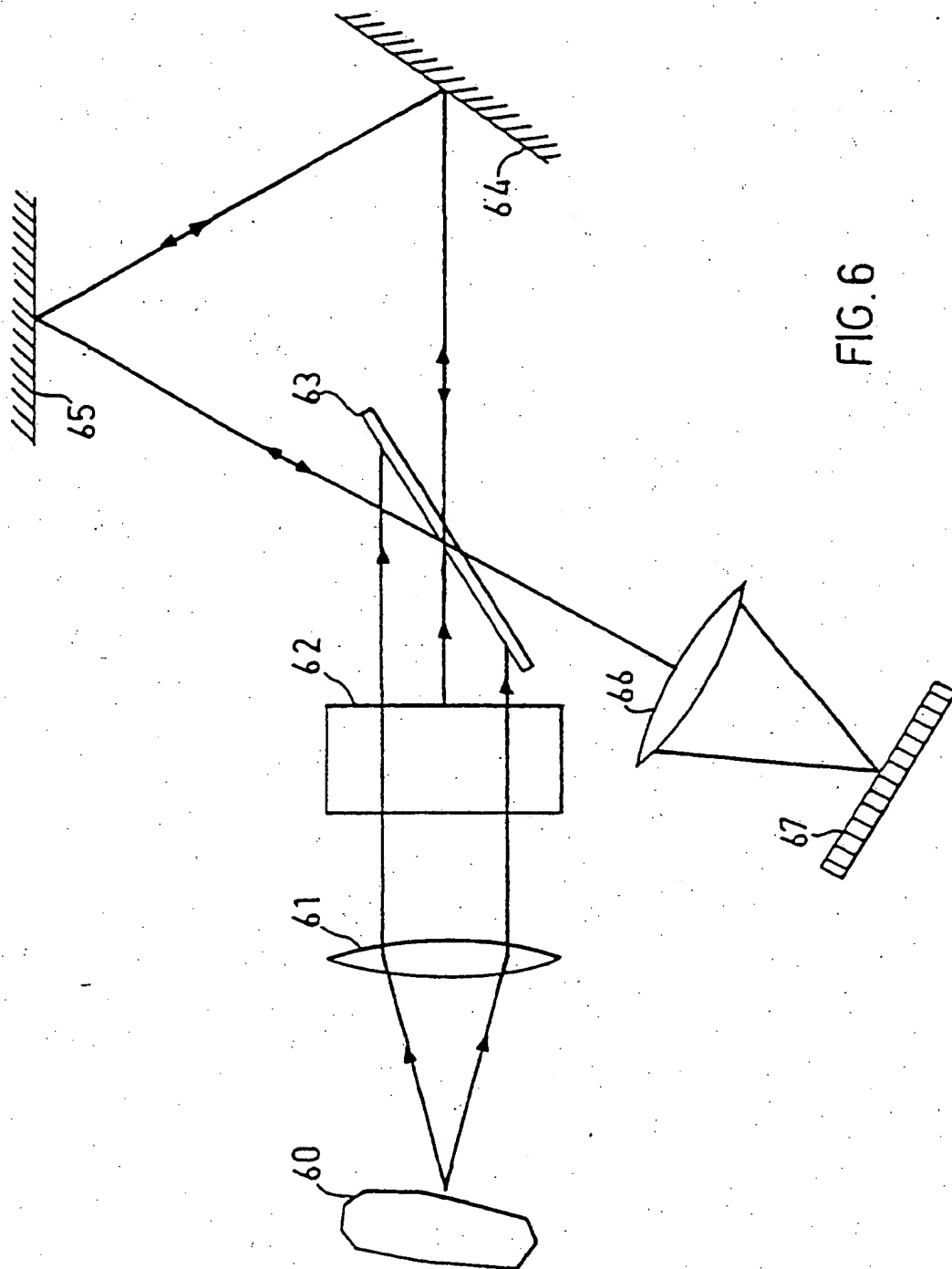


FIG. 6

02.03.00

FIG. 6a

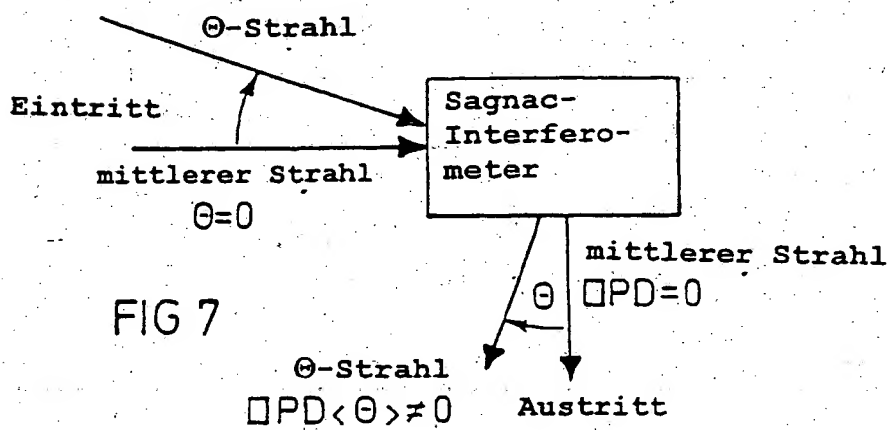
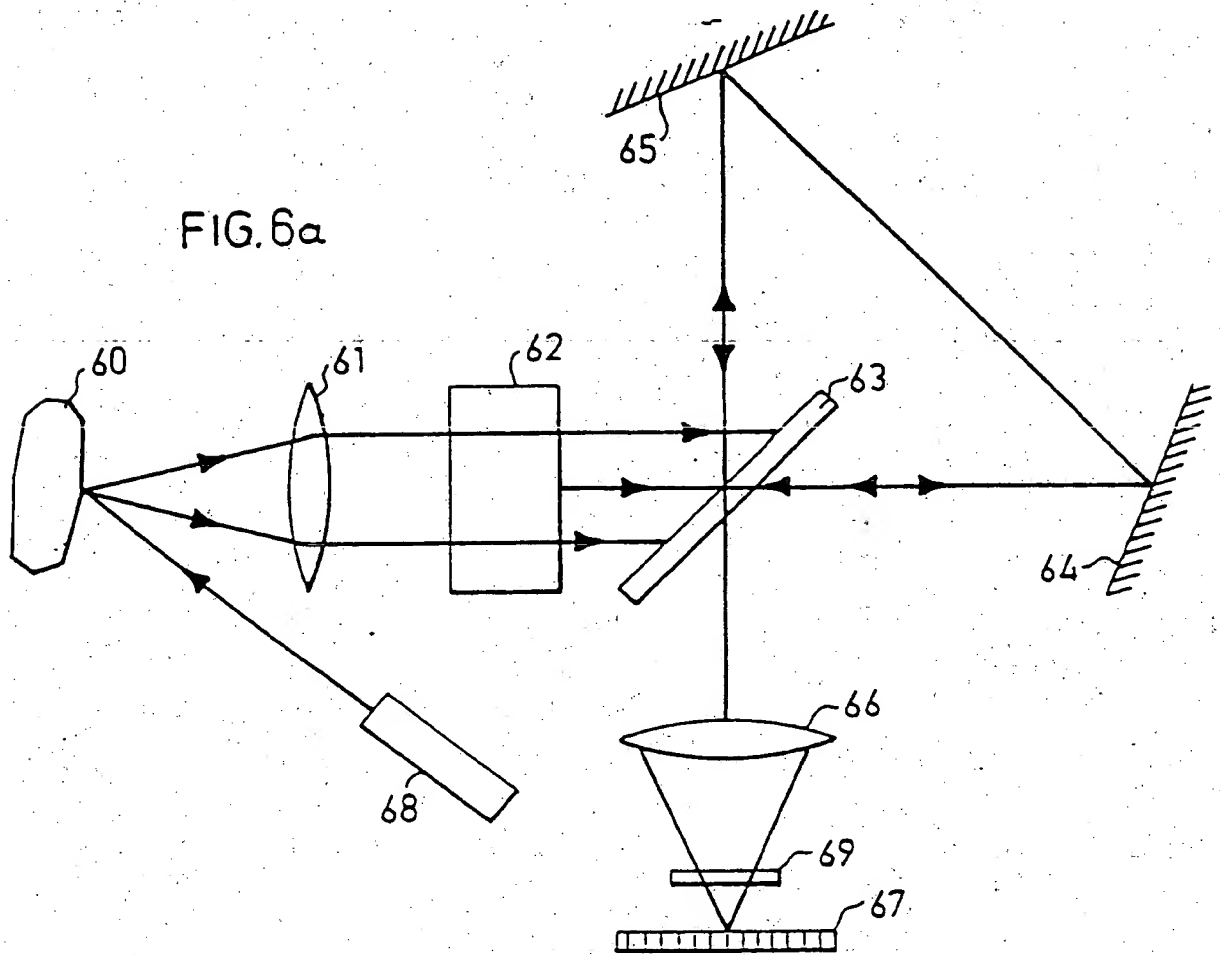


FIG 7

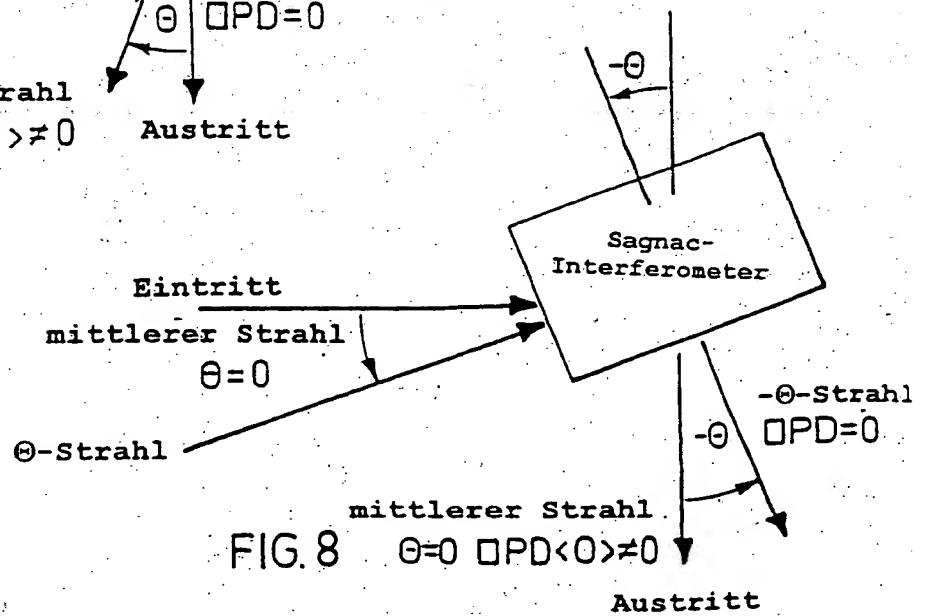


FIG. 8

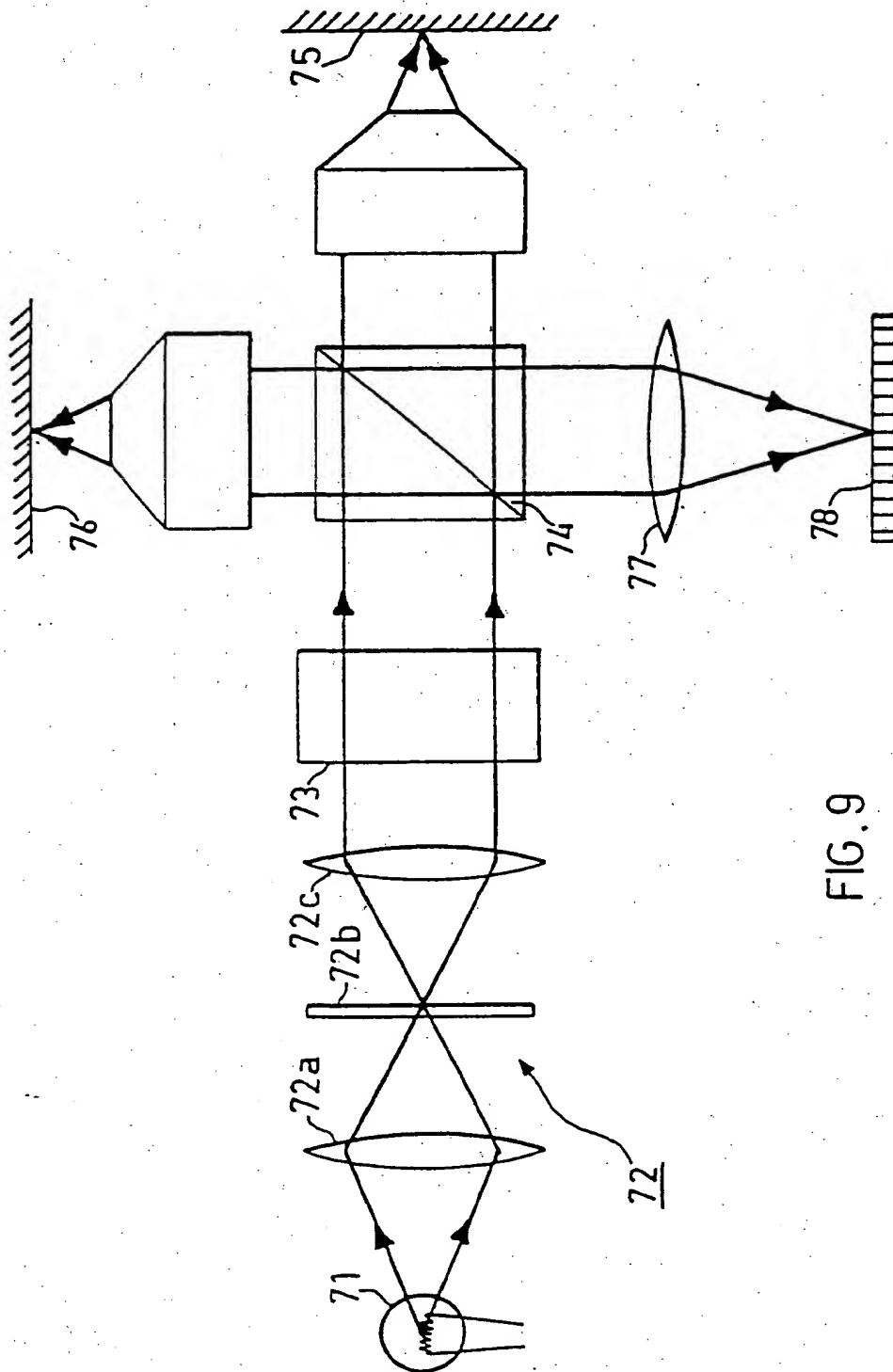


FIG. 9

FIG. 10

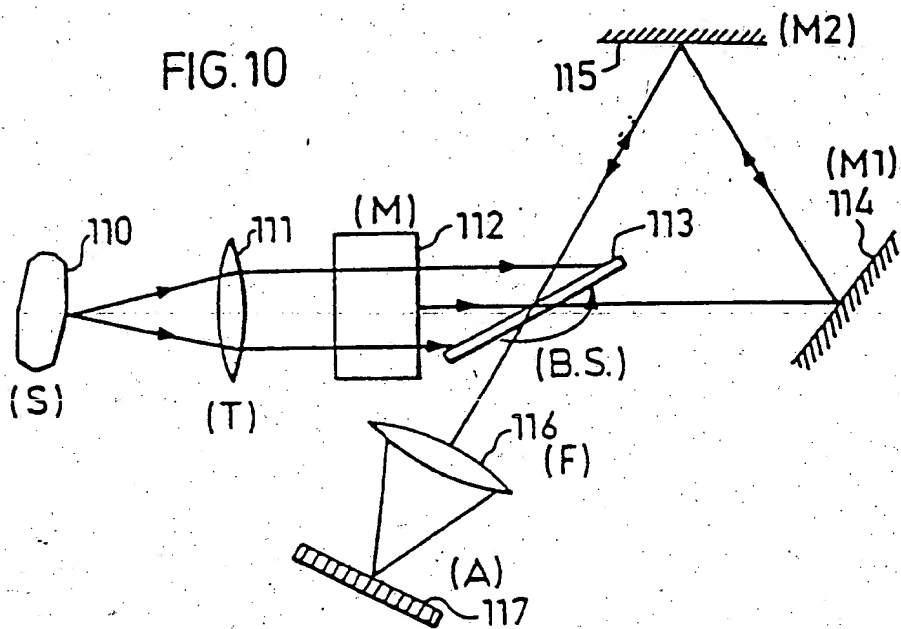


FIG. 11

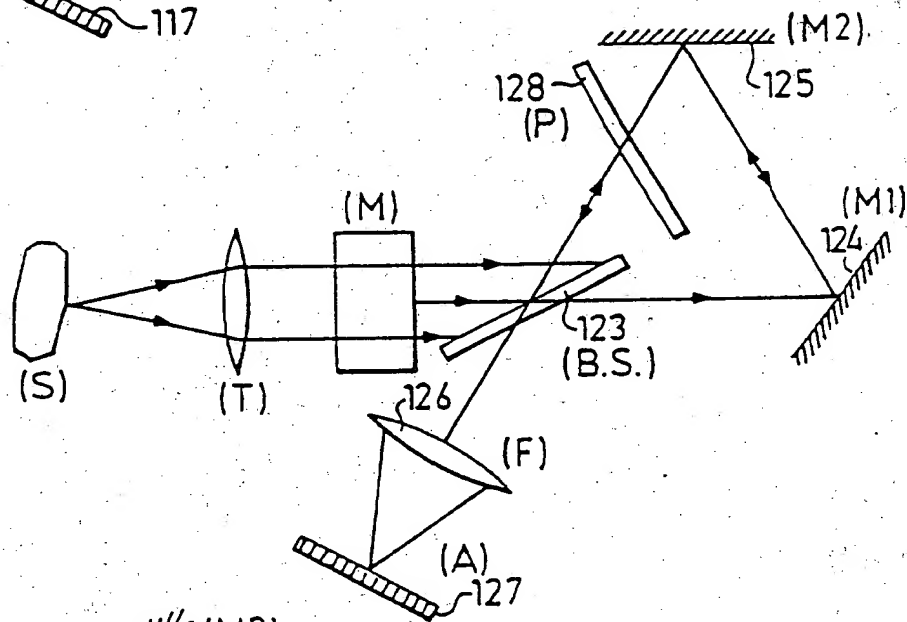


FIG. 12

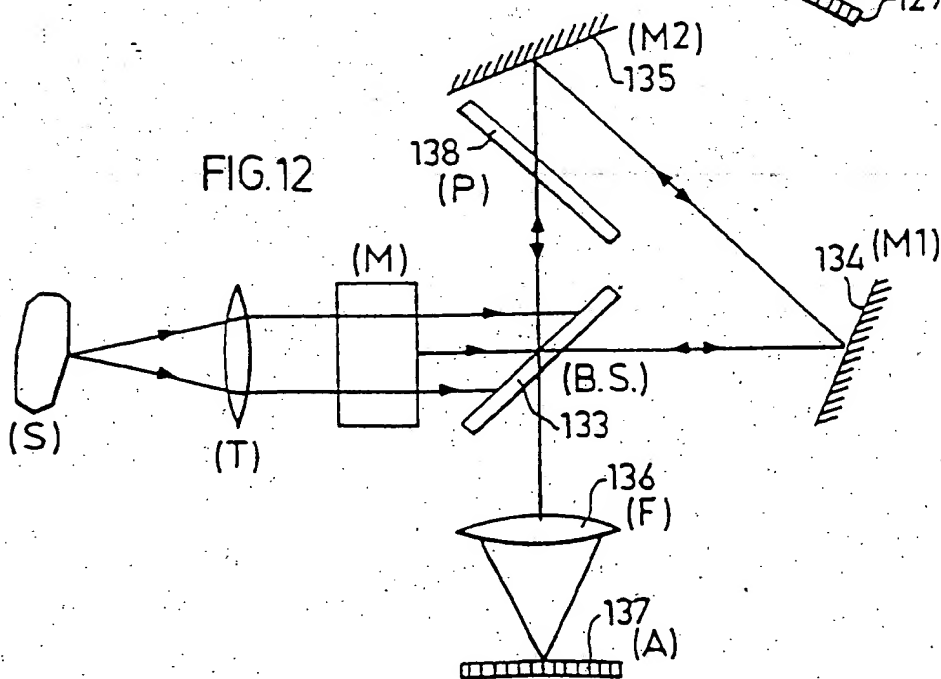




FIG.13

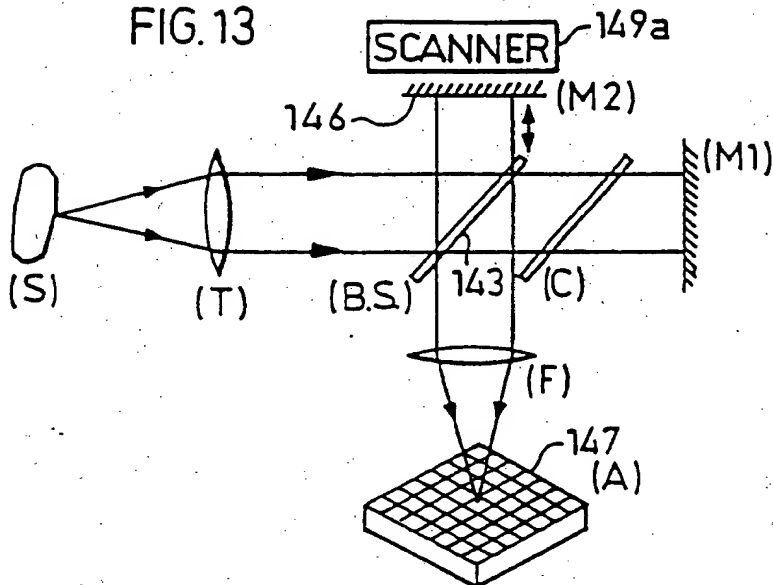


FIG.14

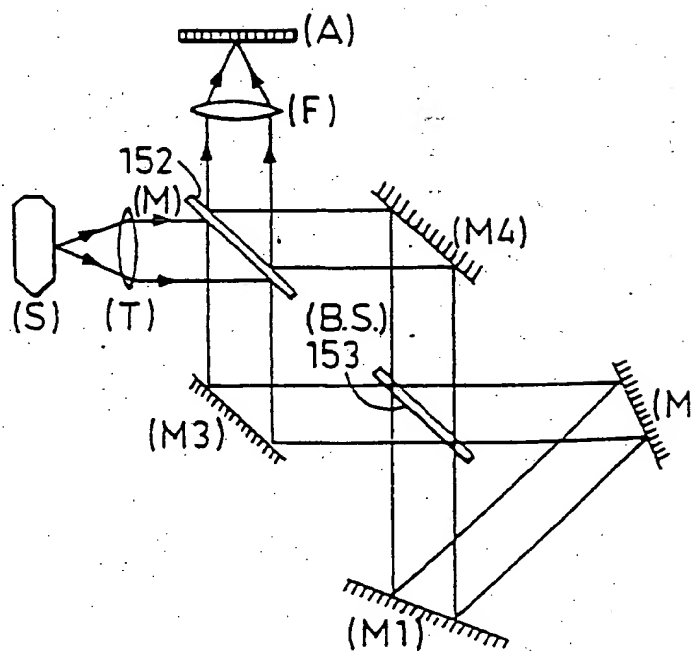


FIG.15

